

POUR COMPTER RENDU
PRIX 10^{fr}

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

486

SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE
ET MOUVEMENTS

(Physique relativiste)

CURRENT SCIENCE
RECEIVED.

PAR

11.7.37.

Augustin SESMAT

Professeur d'Histoire et de Critique des Sciences
à l'Institut Catholique de Paris

I

GENÈSE
DES THÉORIES DE LA RELATIVITÉ



PARIS

HERMANN & C^{ie}, ÉDITEURS

6, Rue de la Sorbonne, 6

1937





ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE MM.



René AUDUBERT

DIRECTEUR DE LABORATOIRE À L'ÉCOLE
DES HAUTES ÉTUDES

ÉLECTROCHIMIE THÉORIQUE

J.-P. BECQUEREL

PROFESSEUR AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE

OPTIQUE ET MAGNÉTISME

AUX TRÈS BASSES TEMPÉRATURES

G. BERTRAND

MEMBRE DE L'INSTITUT
PROFESSEUR À L'INSTITUT PASTEUR

CHIMIE BIOLOGIQUE

L. BLARINGHEM

MEMBRE DE L'INSTITUT
PROFESSEUR À LA SORBONNE

BIOLOGIE VÉGÉTALE

Georges BOHN

PROFESSEUR À LA FACULTÉ DES SCIENCES

ZOOLOGIE EXPÉRIMENTALE

J. BORDET

PRIX NOBEL

DIRECTEUR DE L'INSTITUT PASTEUR DE BRUXELLES

MICROBIOLOGIE

J. BOSLER

DIRECTEUR DE L'OBSERVATOIRE DE MARSEILLE

ASTROPHYSIQUE

Léon BRILLOUIN

PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE

THÉORIE DES QUANTA

Louis de BROGLIE

MEMBRE DE L'INSTITUT
PROFESSEUR À LA SORBONNE
PRIX NOBEL DE PHYSIQUE

I. PHYSIQUE THÉORIQUE

II. PHILOSOPHIE DES SCIENCES

Maurice de BROGLIE

DE L'ACADEMIE FRANÇAISE
ET DE L'ACADEMIE DES SCIENCES

PHYSIQUE ATOMIQUE EXPÉRIMENTALE

D. CABRERA

DIRECTEUR DE L'INSTITUT DE PHYSIQUE ET CHIMIE
DE MADRID

EXPOSÉS SUR LA THÉORIE DE LA MATIÈRE

E. CARTAN

MEMBRE DE L'INSTITUT
PROFESSEUR À LA SORBONNE

GÉOMÉTRIE

M. CAULLERY

MEMBRE DE L'ACADEMIE DES SCIENCES
PROFESSEUR À LA FACULTÉ DES SCIENCES

BIOLOGIE GÉNÉRALE

L. CAYEUX

MEMBRE DE L'INSTITUT
PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE

GÉOLOGIE

A. COTTON

MEMBRE DE L'INSTITUT
PROFESSEUR À LA SORBONNE

MAGNÉTO-OPTIQUE

Mme Pierre CURIE

PROFESSEUR À LA SORBONNE
PRIX NOBEL DE PHYSIQUE
PRIX NOBEL DE CHIMIE

RADIOACTIVITÉ ET PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Véra DANTCHAKOFF

Ancien PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ COLUMBIA
(NEW-YORK)

ORGANISATEUR DE L'INSTITUT
DE MORPHOGÉNÈSE EXPÉRIMENTALE
(MOSCOW OSTAKINO)

LA CELLULE GERMINALE DANS L'ONTOGÉNÈSE ET L'ÉVOLUTION

E. DARMOIS

PROFESSEUR À LA SORBONNE

CHIMIE-PHYSIQUE

K. K. DARROW

BELL TELEPHONE LABORATORIES

CONDUCTIBILITÉS DANS LES GAZ

Arnaud DENJOY

PROFESSEUR À LA SORBONNE

THÉORIE DES FONCTIONS DE VARIABLE RÉELLE

J. DUESBERG

RECTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE

BIOLOGIE GÉNÉRALE EN RAPPORT AVEC LA CYTOLOGIE

CATALOGUE SPÉCIAL SUR DEMANDE

B. S. Msharary

DU MÊME AUTEUR :

(LIBRAIRIE HERMANN)

I. — SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE ET MOUVEMENTS
(*Physique classique*)

- I. — Le problème des mouvements réels.
- II. — L'Ancienne astronomie, d'Eudoxe à Descartes.
- III. — Mécanique newtonienne et gravitation.
- IV. — Le système absolu de la mécanique.
- V. — L'optique des corps au repos.
- VI. — L'optique des corps en mouvement.
- VII. — L'esprit de la science classique.

II. — SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE ET MOUVEMENTS
(*Physique relativiste*)

- I. — Genèse des théories de la relativité.
- II. — Principes de la théorie restreinte.
- III. — Les systèmes privilégiés de la théorie restreinte.
- IV. — Principes de la théorie générale.
- V. — Théorie relativiste de la gravitation.
- VI. — Les systèmes privilégiés de la théorie générale.
- VII. — Essai critique sur la doctrine relativiste.

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays.

COPYRIGHT 1937 BY LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET C^{ie},
PARIS.



AVANT-PROPOS

Nous avons consacré une assez longue étude historique et critique au *système de référence absolu* classique et au discernement des mouvements réels.

Voici comment cette étude pourrait en deux mots se résumer : la Mécanique de Newton admettait, on le sait, un privilège commun de tous les systèmes d'inertie par rapport aux systèmes accélérés ; l'Optique de Fresnel, et l'Electro-Magnétisme de Maxwell et de Lorentz, admettaient, en plus, l'existence d'un système d'inertie privilégié par rapport à tous les autres systèmes d'inertie ; selon nous, si l'on veut pousser à fond les principes de Newton, on est conduit à admettre en Mécanique aussi un système d'inertie privilégié par rapport à tous les autres, et le même qu'en Optique et en Electro-Magnétisme. Autrement dit il existe en droit pour toutes les lois de la physique classique non seulement toute une catégorie de systèmes relativement privilégiés, mais encore un système jouissant d'un privilège unique.

Que devient cette thèse dans la physique de la relativité, dont le nom évoque l'idée toute opposée d'une équivalence de tous les systèmes de référence ?

Le présent travail a pour but précis de répondre à cette question. Comme on peut s'y attendre, il comprendra à la fois un exposé et une critique des principes de la nouvelle physique, et tout spécialement de ceux qui concernent le rôle des systèmes de référence — ou de leur équivalent — dans les théories : *la conclusion sera qu'il existe encore des systèmes privilégiés dans la physique relativiste.*

Une courte introduction historique va nous permettre d'abord

de préciser les données du problème ; et c'est seulement à la fin de cette introduction que nous pourrons indiquer utilement le plan de tout l'ouvrage.

Quant à la méthode suivie dans l'exposé, nous pouvons dire que nous nous sommes efforcé, tout en employant un minimum indispensable de formules mathématiques, de dégager et d'exprimer en mots les idées essentielles de la doctrine, ce qui permettra peut-être à un plus grand nombre d'en prendre connaissance ; et que par ailleurs nous nous sommes attaché tout particulièrement à l'élucidation des postulats, des hypothèses et des conséquences, non moins qu'à l'examen des conditions auxquelles doivent satisfaire les expériences de contrôle.



INTRODUCTION

ARTICLE PREMIER

SUR LA GENÈSE DES THÉORIES DE LA RELATIVITÉ

1. Les systèmes de référence en Physique. — L'étude de la réalité physique et de ses lois devrait pour être complète s'étendre à l'*histoire* de l'Univers. En fait les physiciens, parce qu'ils croient à la constance du déterminisme physique au cours du temps, se tiennent aisément pour satisfaits quand ils sont parvenus à découvrir les lois du déroulement *actuel* des phénomènes.

En tout cas, comme les phénomènes physiques consistent presque toujours en des mouvements des corps matériels ou en des changements d'état de ces corps qui dépendent de leurs mouvements, leur description méthodique et plus encore leur explication nécessitent l'usage de *systèmes de référence* qui permettent de définir d'une façon précise les mouvements physiques, c'est-à-dire d'attribuer aux corps ou aux particules des positions déterminées aux différents instants de la durée. D'ailleurs ce ne serait pas assez de connaître les lois qui déterminent les phénomènes dans tel ou tel système de référence considéré isolément : en effet le physicien, qui lorsqu'il observe est ordinairement immobile par rapport à la Terre, a souvent affaire à des phénomènes qui affectent des corps soumis relativement à lui à quelque mouvement d'entraînement, ou encore à des phénomènes qui se passent complètement dans d'autres systèmes de référence que celui où il est immobile — car c'est précisément leur mouvement relatif qui oppose l'un à l'autre deux systèmes de référence quelconques ; or ce fait exige qu'on sache passer des lois qui régissent les phénomènes dans tel système de référence aux lois qui les régissent dans tel autre système, dont on connaît le mouvement par rapport au premier.

Quels sont donc les systèmes de référence utilisés en Physique ? Leur choix est-il indifférent ; ou s'il en est qui s'imposent de préférence, quels sont-ils et d'où vient leur supériorité ? Les réponses diffèrent suivant que l'on veut se tenir plus près des données directement vérifiables, ou qu'on se donne le droit de les compléter ou de les préciser par la pensée. Plaçons-nous d'abord au premier point de vue, plus positif : de ce point de vue nous devrons encore distinguer, du moins en ce qui concerne la science classique, entre les conclusions de la Mécanique et celles de l'Optique et de l'E. M. (1).

2. Les systèmes privilégiés multiples de la Mécanique classique.

— En Mécanique on trouve que les mouvements actuels des corps s'expliquent immédiatement selon les lois fondamentales — c'est-à-dire selon le principe d'inertie et la loi $\gamma = \frac{f}{m}$ — quand on les rapporte soit à un système de référence lié au centre de gravité du système solaire et dépourvu de toute rotation par rapport aux étoiles, — on peut dire pour abréger au système de référence *solaire* ; soit à n'importe quel autre système en translation *r.* et *u.* (2) relativement à celui-là. Tous ces systèmes s'appellent des *systèmes d'inertie*. A un moment donné quelconque, la Terre, en dépit de sa rotation diurne et parce que cette rotation est relativement lente, est à très peu près un système d'inertie. L'obéissance des corps aux lois fondamentales s'y manifeste, par exemple, par le fait qu'un homme debout sur le sol s'y tient en équilibre sans difficulté. L'équivalence de tous les systèmes d'inertie s'explique d'ailleurs aisément : en effet la loi $\gamma = \frac{f}{m}$ n'annonce rien d'autre que l'accélération γ d'une masse m sous l'action d'une force f ; et le principe d'inertie rien d'autre que l'accroissement de vitesse $v = \gamma t$ d'une masse qui a subi une accélération γ pendant le temps t . Or cette accélération et cet accroissement, qui ne sont que des *différences* de vitesse, sont indépendants des vitesses primitives des masses intéressées,

(1) Ces deux initiales sont celles du mot composé *Electro-Magnétisme*, que nous nous dispenserons d'écrire en toutes lettres.

(2) Nous désignons par ces deux initiales les mots *rectiligne* et *uniforme*, qui doivent revenir très souvent sous notre plume.

et par conséquent sont les mêmes dans deux systèmes de référence en translation r. et u. l'un par rapport à l'autre.

Au contraire les mouvements des corps n'obéissent plus immédiatement aux lois fondamentales quand on les rapporte à des systèmes *accélérés* par rapport aux systèmes d'inertie : un train qui démarre ou qui freine, une automobile dans un virage, sont des systèmes accélérés : les dérogations aux lois fondamentales s'y révèleront, par exemple, par le fait qu'un homme qui veut se tenir debout dans ces systèmes y perd son équilibre ou doit faire effort pour le conserver ; et elles s'expliquent par cette raison que les accélérations d'un même corps ne sont pas les mêmes dans deux systèmes de référence accélérés l'un par rapport à l'autre.

Ainsi, en ce qui concerne l'applicabilité immédiate des lois de la Mécanique, un système d'inertie quelconque est privilégié par rapport à un système accéléré quelconque ; mais tous les systèmes d'inertie sont équivalents entre eux. Avant de rechercher si cette équivalence ne recouvrirait pas une différence réelle, demandons-nous quels sont les systèmes de référence de l'Optique et de l'E. M.

3. Le système absolument privilégié de l'Optique et de l'Electromagnétisme. — L'Optique de Fresnel, puis l'E. M. de Maxwell, qui absorba l'optique en faisant de la lumière un phénomène é. m. ⁽¹⁾, enfin l'E. M. de Lorentz, qui n'est qu'une adaptation à la théorie des électrons de l'E. M. de Maxwell, reposaient sur une même assise profonde, la notion d'*éther*. Or les trois grands physiciens, en dépit de divergences portant sur d'autres points, furent d'accord pour penser que cet éther dans son ensemble, c'est-à-dire abstraction faite des mouvements vibratoires de ses particules, était immobile, en ce sens qu'il pouvait servir de système de référence pour tous les mouvements que la Mécanique regardait comme réels.

Cette hypothèse résolvait l'importante question du mouvement ou du repos des astres, de notre globe en particulier, par rapport à l'éther : l'ensemble des étoiles devait être regardé comme fixe — pour autant qu'on peut parler ici de fixité — par

⁽¹⁾ Dans notre texte nous désignerons par ces deux minuscules é. m. l'adjectif *électro-magnétique*, comme par les deux majuscules E. M. le substantif *Electro-Magnétisme*.

rapport à l'éther universel, et l'éther devenait ainsi solidaire d'un des systèmes d'inertie de la mécanique ; le système de référence solaire devenait un système en translation r. et u. par rapport à l'éther ; la Terre en rotation, un système tournant par rapport à l'éther ; enfin la Terre en translation, abstraction faite de son mouvement diurne et des lentes variations de sa vitesse orbitale, un autre système en translation constante par rapport à l'éther.

Mais tout ceci entraînait des conséquences : les lois fondamentales de l'Optique et de l'E. M. en effet ne devaient se vérifier rigoureusement, d'après la théorie, que dans les relations optiques ou é. m. entre corps *au repos par rapport à l'éther* ; par exemple la vitesse de propagation de la lumière dans le vide ne devait se manifester avec sa vraie valeur que pour un récepteur fixe dans l'éther ; la fréquence des vibrations issues d'une source et supposées reçues par un récepteur fixe dans l'éther n'était la fréquence d'émission que si la source était elle-même immobile. Le mouvement relatif à l'éther d'un des deux corps devait toujours modifier sur quelque point les lois idéales concernant les corps au repos ; quant aux systèmes de corps entraînés par rapport à l'éther dans une même translation r. et u., on démontrait que si leur commun mouvement ne devait pas influencer certaines de leurs relations observables — par exemple ne devait pas troubler l'égalité des fréquences de réception et d'émission — il devait toujours par contre modifier la vitesse apparente de propagation, de quelque manière qu'on voulût la mesurer.

Bref le système de référence constitué par l'éther était, selon les théories classiques, *absolument privilégié* par rapport à tous les autres systèmes d'inertie en ce qui concerne l'applicabilité des lois de l'Optique et de l'E. M. *A fortiori* ces lois ne devaient-elles plus se vérifier immédiatement dans les systèmes accélérés.

Alors donc qu'en Mécanique tous les systèmes d'inertie jouissaient d'un même privilège par rapport aux systèmes accélérés, en Optique — et en E. M. — un système unique, celui où l'éther était immobile, apparaissait privilégié. Différence étrange entre deux domaines de la physique, et qu'on devait naturellement chercher à supprimer, soit en niant le privilège de l'éther en Optique et en E. M., soit au contraire en l'étendant au cas de la Mécanique. Nous allons voir que les théoriciens de la Mécanique

pouvaient parfaitement, *a priori* du moins, adopter cette seconde solution.

4. Le système absolu de la Mécanique conçu comme lié à l'espace. — Les lois de la Mécanique se formulent de façon rigoureuse ; or elles ne peuvent s'énoncer sans qu'on adopte un système de référence rigoureusement défini lui aussi et par rapport auquel soient concevables les lignes droites et les vitesses constantes du principe d'inertie, et les accélérations de la loi $\gamma = \frac{f}{m}$. Par ailleurs les lois de la Mécanique s'étant montrées aptes à rendre compte des mouvements des corps partout où peuvent atteindre les observations, on était en droit — et c'est la thèse des Newtoniens — de conclure à leur validité universelle : dès lors il faut qu'il existe un système de référence rigoureusement déterminé et par rapport auquel s'accomplissent tous les mouvements que la Mécanique regarde comme réels, c'est-à-dire explique par des forces actuellement ou antérieurement appliquées aux masses.

Ce système de référence, Newton l'avait identifié à l'*espace absolu*, qu'il regardait comme une sorte de réalité indépendante des corps. On peut douter de l'existence séparée d'un tel espace ; mais on ne peut pas méconnaître les avantages du système de référence universel que l'idée d'espace absolu permettait de définir, système qu'on peut qualifier lui-même d'absolu, et que nous appellerons souvent, pour simplifier, le système Σ .

D'abord le système absolu est conçu comme un système où les lois de la Mécanique s'appliquent *rigoureusement* : supériorité évidente sur le système concret constitué par l'ensemble des étoiles ; en effet d'après la loi même de gravitation aucun astre ne peut être immobile ; d'où ces étoiles, qui permettent de dire que par rapport à elles le système de référence solaire ne tourne pas et que son origine n'a pas d'accélération, sont elles-mêmes en mouvement, bien que leurs énormes distances relativement à nous nous les fassent paraître à peu près fixes les unes par rapport aux autres ; aussi la définition des systèmes d'inertie par le moyen des étoiles n'est-elle pas rigoureuse, même pour notre région solaire, très éloignée d'elles ; bien plus, pour la région même des étoiles elle perdrait toute signification. Le recours à un système absolu détaché de tout corps concret et par là valable dans tout

l'espace remédie parfaitement à cette absence de rigueur et d'universalité.

D'autre part le système absolu est aussi un système par rapport auquel les lois de la Mécanique se sont appliquées de tout temps (même à des époques où les étoiles pouvaient n'être pas encore constituées) ; et ceci permet de résoudre, du moins en principe, la question de la réalité de tous les mouvements actuels, en particulier du mouvement de tous les systèmes de référence concrets. Admettons en effet que tous les mouvements réels de l'Univers ont une cause mécanique ; nous reconnaîtrons alors que, comme nous l'indiquions en commençant, la considération du seul état présent du monde est insuffisante, puisqu'elle ne fait pas comprendre les vitesses « initiales » des masses ou des systèmes qu'on regarde comme mobiles ; admettons d'autre part que l'histoire mécanique du monde a eu un commencement, c'est-à-dire a comporté un état premier où toutes les masses étaient au repos, faute d'avoir jamais subi l'action d'aucune force : cette limitation de la durée dans le passé permet seule d'échapper aux obscurités de la thèse opposée. Dans ces conditions, nous pouvons dire non seulement que les accélérations dues à l'action de forces actuellement appliquées ont lieu dans le système absolu, mais encore qu'il faut rapporter à ce même système les vitesses constantes consécutives à l'action des forces, ou plutôt — car on ne conçoit guère que dans notre monde des masses soient jamais complètement soustraites à l'action de toute force — les vitesses *à peu près constantes* des corps ou des systèmes de corps soumis à des forces relativement très faibles.

Mais alors nous voici en mesure d'interpréter l'équivalence des systèmes de référence multiples de la mécanique positive : nous nous rendons compte maintenant qu'un seul parmi tous les systèmes d'inertie est immobile, le système Σ , qui est lié à l'espace absolu : tous les autres sont des systèmes en translation r . et u . par rapport à Σ . S'ils sont détachés de tout corps et purement conceptuels, leur mouvement lui-même n'est que conceptuel et n'a pas à être expliqué ; mais s'ils sont liés à quelque système matériel, leur mouvement est réel et leur vitesse à peu près constante ne peut résulter que de l'action des forces qui leur furent appliquées à chaque moment antérieur de l'histoire du monde.

En tout cas en raison de son immobilité le système absolu Σ nous apparaît désormais comme doué d'un privilège par rapport à tous les autres systèmes d'inertie : à savoir que les lois de la mécanique, même en ce qui concerne les vitesses, s'y appliquent réellement de façon immédiate, tandis que dans les systèmes d'inertie mobiles, elles sont troublées en fait par le mouvement du système et ne paraissent se vérifier immédiatement que par un phénomène de compensation. Un exemple simple va faire comprendre la différence : supposons que dans Σ un projectile primitivement au repos absolu soit lancé dans une certaine direction avec une vitesse initiale v qui ensuite demeure constante (fig. 1) : au bout

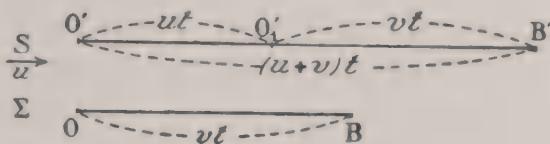


Fig. 1.

d'un temps t le projectile a parcouru le trajet $d = vt$, et c'est la mesure du temps de parcours t et du trajet d qui permet à un observateur de Σ de calculer la vitesse v , laquelle est bien la vitesse absolue réelle du projectile, nous voulons dire celle qui résulte pour lui de l'action de la force employée à le lancer. Considérons maintenant un autre système d'inertie, S , animé d'une vitesse u par rapport à Σ ; et supposons qu'on y lance, dans la direction et le sens de u , avec la même force que tout à l'heure, un projectile identique au premier, mais préalablement entraîné dans le mouvement de S ; ce projectile aura bien relativement à S la même vitesse v que le premier, c'est-à-dire qu'au bout du temps t il aura parcouru dans S un trajet d , et que l'observateur de S en divisant ce trajet par le temps t obtiendra un quotient égal à v : en cela les deux systèmes sont bien équivalents.

Mais voici où ils diffèrent : comme le projectile de Σ partait du repos, au point O , sa vitesse absolue était simplement v ; et son trajet absolu, du point de départ O au but B simplement $OB = vt$. Le projectile de S au contraire avait avant d'être lancé, en O' , une vitesse absolue égale à u ; une fois lancé il a la vitesse absolue $u + v$; son trajet absolu de O' en B' est $(u + v)t$. Seulement, toujours du point de vue de Σ , pendant le temps t l'origine O' de S

est venue en O_1' , de telle sorte que $O'O_1' = ut$; d'où pour l'observateur de S qui regarde O' et B' comme immobiles le trajet parcouru paraît être seulement $O_1'B'$, c'est-à-dire $(u + v)t - ut = vt$. C'est donc bien grâce à un phénomène de *compensation* que l'observateur de S attribue à son projectile la même vitesse relative v que l'observateur de Σ attribuait au sien, compensation entre l'accroissement de vitesse absolue du projectile de S et la fuite du but devant lui.

Bref, grâce au système absolu la reconstruction mécanique du monde peut, du moins pour la pensée prolongeant les données de la science positive, se fonder sur une base solide, s'achever, dans le Temps comme dans l'Espace, et s'achever rigoureusement; et l'un des corollaires de cet achèvement est que, en dépit d'une équivalence apparente, le système absolu est en réalité privilégié par rapport à tous les systèmes d'inertie mobiles, comme la seule idée d'un système absolu le faisait prévoir.

De plus l'éther lui-même, qu'on savait déjà immobile dans son ensemble par rapport à l'un des systèmes d'inertie de la mécanique, sera tout naturellement lié, s'il existe, au système absolu que nous venons de définir; et même si, comme plusieurs physiciens classiques l'ont pensé déjà, l'éther n'a pas de réalité physique, s'il faut lui substituer simplement, en E. M., un champ de forces absolument privilégié, c'est-à-dire un système de référence dans lequel, à l'exclusion de tout autre, les lois de l'E. M. s'appliquent rigoureusement, ce système de référence s'identifiera encore au système Σ de la Mécanique, et de toute façon la Physique entière s'édifiera sur la même assise fondamentale.

Que si l'on objectait à cette thèse qu'elle est invérifiable, autant parce que nos observations sont bornées dans le Temps et dans l'Espace que parce que leur précision est imparfaite, les absolutistes pourraient répondre en principe que des observations approximatives, — étant donné qu'on sait rendre compte par la théorie elle-même de leur imperfection — peuvent suffire au contrôle d'une théorie rigoureuse, parce que les éléments de la théorie au lieu de se vérifier un à un, ce qui les laisserait en effet tous incertains, se vérifient au contraire solidairement, c'est-à-dire par une convergence de réussites dont la vérité rigoureuse de la théorie entière est la seule explication plausible; et que d'autre part des observations restreintes à une région du monde et à une

période de son histoire autorisent l'extension universelle de la théorie, dès lors que cette extension n'est contredite par aucun fait et que par ailleurs elle complète harmonieusement les enseignements limités d'une science plus positive.

Telle est dans son esprit la thèse de l'espace absolu, celle qu'admettaient plus ou moins explicitement beaucoup de disciples de Newton, de Fresnel, et de Maxwell : thèse séduisante en vérité pour tout homme qui ne s'est pas fait l'esclave d'un empirisme systématique d'ailleurs impraticable. Mais ne suppose-t-elle pas l'existence d'un espace indépendant des corps, et ce réalisme ne suffit-il pas à la compromettre ? Nous allons voir qu'il n'en est rien.

5. Le système absolu de la Mécanique dégagée de l'idée d'espace. — Partons de cette hypothèse essentielle au newtonisme que les lois fondamentales de la Mécanique, quoi qu'il en soit d'ailleurs de la loi spéciale de la gravitation, sont universellement valables. Admettons d'autre part, ne serait-ce qu'en raison des difficultés et de la gratuité des hypothèses contraires, que le monde matériel est *fini* dans l'espace, ce qui nous permettra de parler de son centre de gravité, et que son histoire *a commencé*, ce qui nous autorisera à parler d'un moment initial où nous pourrons supposer — c'est du moins l'hypothèse la plus simple — que toutes les masses étaient au repos relatif. Dès lors nous sommes en droit d'appliquer à l'ensemble des masses de l'Univers les théorèmes généraux de la Dynamique — nous verrons dans un instant à quoi cela nous servira ; — et avant tout de nier tout mouvement qui n'aurait pas été produit par des forces. Nous dirons, en conséquence, que tous les mouvements réels des masses, depuis le début, s'accomplissent à partir de leurs positions absolument initiales ; en d'autres termes que l'ensemble de ces positions, que nous n'avons aucune raison de ne pas considérer comme des *positions de repos*, et qu'en raison même de leur rôle primordial en mécanique nous ne devons ni ne pouvons situer par rapport à rien d'autre, déterminent notre système de référence absolu Σ (¹) ;

(¹) Les *positions* à un instant donné d'un ensemble de masses ne sauraient caractériser par elles-mêmes un système de référence, puisqu'elles sont compatibles avec des *vitesses* quelconques de ces masses ; c'est pourquoi nous précisons que les positions premières dont il s'agit étaient pour les masses

que par suite actuellement encore les masses quand elles se meuvent relativement à ce système sont en relations par là même avec leurs positions premières — en relation à distance dans le temps, comme elles sont en relation à distance dans l'espace du fait des forces qui s'exercent entre elles prises deux à deux.

De cette façon, sans réaliser l'espace en dehors des corps, nous obtenons un système absolu qui équivaut intégralement au système lié à l'espace réalisé, et qui a l'avantage d'être défini exclusivement en fonction de positions réelles des masses à un moment passé de leur histoire. Aussi bien et nous y reviendrons, ce recours au *passé* pour comprendre à fond les mouvements présents est conforme à la nature d'un monde dynamique : refuser de sortir de *l'actuel* pour découvrir les repères des mouvements réels, c'est raisonner comme si l'Univers était une réalité statique dont les éléments ne seraient liés que dans l'espace ; chercher dans le passé des positions des masses qui puissent constituer un système absolu pour tous les mouvements ultérieurs, c'est simplement s'autoriser du fait que l'Univers est une réalité qui se déroule et dont les éléments sont liés aussi dans le temps.

Tout cela il est vrai demeure conceptuel, encore que parfaitement d'accord avec les principes de la Mécanique. Mais voici qui, en droit, va rapprocher cette conception des conditions de notre expérience : l'ensemble des masses de l'Univers constitue nécessairement un système soustrait à toute action extérieure ; donc, appliquant à l'Univers deux théorèmes bien connus de la Dynamique, nous pouvons dire 1^o que son centre de gravité est toujours immobile dans le système absolu ; 2^o que l'Univers est dépourvu dans ce système de toute « rotation » d'ensemble. (Nous disons rotation pour abréger, et pour n'avoir pas à introduire la notion de moment cinétique résultant par rapport à un point donné.)

Maintenant nous pouvons, sans nous écarter de l'esprit positif, supposer que notre science du dynamisme universel, développée par les mêmes moyens d'investigation que nous employons présentement, s'achève un jour, et par exemple nous renseigne aussi

des positions *de repos* : c'est à ce titre uniquement qu'elles sont aptes à déterminer un système de référence fondamental ; on voudra bien s'en souvenir chaque fois que pour abréger nous parlerons simplement de positions premières.

bien, et même mieux, sur l'Astronomie cosmique que nous sommes renseignés aujourd'hui sur l'Astronomie solaire. Or à ce moment-là nous serions à même de situer par rapport à des corps concrets le système absolu Σ que nous avons défini par les positions toutes premières des masses, et voici comment. Nous choisissons comme trièdre de référence observable un trièdre déterminé par quatre étoiles non situées dans un même plan. Ce premier trièdre, à peu près nécessairement, tourne par rapport à Σ , et son origine est accélérée ; donc si nous voulons expliquer tous les mouvements des astres par rapport à ce trièdre, nous serons contraints de reconnaître l'insuffisance des forces réelles — que nous supposons toutes connues — et de leur adjoindre des « forces d'inertie » correspondant les unes à la rotation des axes, les autres à l'accélération de l'origine ; mais alors la nature de ces forces ajoutées nous fera connaître cette rotation et cette accélération ; et pour obtenir un système d'inertie universel il nous suffira d'adopter un autre trièdre, différent du premier par ces deux mouvements changés de signe. Sans doute ce système d'inertie sera probablement mobile dans Σ ; mais, connaissant par hypothèse les rapports de toutes les masses existantes, et leurs positions actuelles, capables par conséquent de situer *le centre de gravité du monde*, et de connaître son mouvement $r.$ et $u.$ par rapport à notre trièdre d'inertie mobile, il nous suffira d'adopter un troisième trièdre différent du second par une translation $r.$ et $u.$ égale à celle du centre de gravité de l'Univers pour obtenir le système absolu Σ .

On le voit, la thèse absolutiste n'est, en droit, ni liée à la thèse d'un espace séparé des corps, ni sans attaches avec les données positives : bien comprise, et surtout interprétée comme nous venons de le faire, elle pouvait paraître satisfaisante à tous points de vue. Malheureusement, toujours ou presque toujours présentée par ses partisans en fonction de l'idée d'espace, elle se heurta, d'une part, comme nous allons le voir, à des objections philosophiques, et d'autre part, ce qui fut plus grave et vraiment décisif, elle se heurta — ou parut se heurter — à des faits d'expérience ; si bien qu'au lieu d'étendre à la Mécanique l'idée d'un système privilégié unique, on fut conduit à nier d'abord l'existence du système privilégié de l'Optique et de l'E. M., puis à nier, ou du moins à refuser de reconnaître ouvertement, jusqu'à ce privilège, qui paraissait si solidement établi en mécanique, des systèmes d'inertie

par rapport aux systèmes accélérés : et telle sera précisément *l'idée des théories de la Relativité*.

6. La double origine, philosophique et positive, de la doctrine relativiste. — L'existence d'un espace indépendant des corps matériels, *a fortiori* le rôle pour ainsi dire actif qu'on attribuait à un tel espace quand on en faisait le système de référence absolu pour tous les mouvements réels, devaient paraître choses difficilement acceptables : effectivement beaucoup de physiciens de la fin du xix^e siècle surtout se montrèrent sceptiques au sujet de l'espace réalisé, et par voie de conséquence au sujet du mouvement absolu que seul, pouvaient-ils croire, l'espace permettait de concevoir. D'autre part toutes les expériences par lesquelles on essaya au cours du xix^e siècle de mettre en évidence une influence du mouvement de translation de la Terre sur les phénomènes optiques ou é. m. terrestres, expériences qui auraient manifesté par contraste le privilège de l'éther ou du système absolu, avaient échoué. Et telle est la double origine, philosophique et positive, des théories relativistes.

Une histoire véritable de la genèse de ces théories devrait comporter à la fois l'étude suivie de l'évolution des idées sur l'espace et sur les mouvements réels, et l'étude des théories et des expériences relatives au privilège de l'éther. Pour notre dessein, qui est bien plutôt de comprendre et d'apprécier la doctrine que d'en faire l'histoire, nous allons nous contenter, à titre d'introduction, de rappeler d'abord très brièvement, d'autant que nous y avons insisté autre part, en quoi consistaient les expériences négatives auxquelles nous venons de faire allusion sur l'influence du mouvement de la Terre ; ensuite de signaler quelques-uns des philosophes ou des physiciens qui, du point de vue théorique, se sont montrés relativistes avant la lettre. Cet ordre d'exposition ne signifie pas d'ailleurs que la critique philosophique de l'espace et du mouvement absolu ne soit venue qu'en second lieu ; chez plusieurs au contraire elle fut indépendante de la connaissance des difficultés expérimentales : mais peu importe puisqu'il ne s'agit pas ici d'histoire proprement dite.

7. L'échec de la théorie absolutiste devant l'expérience en Optique et en Électromagnétisme. — Les phénomènes optiques et é. m. pourraient affecter des corps au repos dans l'éther ; ils

obéiraient alors à des lois idéales qu'on peut appeler les lois absolues. En dehors de ce cas théorique, les corps intéressés — ils sont généralement dans chaque phénomène élémentaire au nombre de deux — peuvent avoir par rapport à l'éther : *ou bien* des mouvements différents, de telle sorte qu'ils sont nécessairement en mouvement l'un par rapport à l'autre (ce qui arrive aussi quand l'un est au repos et l'autre en mouvement par rapport à l'éther) ; *ou bien* un même mouvement accéléré, de translation ou de rotation ; *ou bien* un même mouvement r. et u. ; dans ces deux derniers cas ils sont évidemment immobiles l'un par rapport à l'autre. Or la distinction entre ces trois cas est très importante dans l'étude des dérogations aux lois absolues produites par le mouvement des corps : on peut dire d'un mot, en effet, que les effets du mouvement prévus par les théories classiques se vérifient toujours dans les deux premiers cas et jamais dans le troisième ; il faut ajouter que dans le premier cas les effets observés peuvent aussi bien s'attribuer, en dépit de différences théoriques minimes, au seul mouvement relatif des deux corps quand il est r. et u. qu'à l'influence combinée de leurs deux mouvements absolus.

Pour emprunter nos exemples à l'Optique, considérons une source lumineuse et un récepteur, et voyons quels sont les effets du mouvement du récepteur, de la source, ou des deux ensemble sur la vitesse, la direction et la fréquence de la lumière, telles qu'elles apparaissent au récepteur ⁽¹⁾.

a. — Quand la source est fixe et le récepteur mobile, la *vitesse* de propagation paraît changée : si c est la vitesse absolue de la lumière et v la vitesse absolue du récepteur dans la direction de propagation, la vitesse de réception est $c + v$ quand le récepteur se rapproche de la source, $c - v$ quand il s'en éloigne ; la *direction* est changée, sauf quand le récepteur se déplace suivant la droite qui le joint à la source : si par exemple la vitesse v du récepteur est perpendiculaire à la direction réelle de la source supposée très éloignée, la direction apparente fait avec cette direction réelle un angle α tel que $\operatorname{tg} \alpha = \beta$, où β représente le rapport $\frac{v}{c}$. C'est le phénomène de l'*aberration* ; la *fréquence* aussi est

⁽¹⁾ Dans tout ce qui suit en effet il ne peut être question que des phénomènes qui affectent, après les sources, des récepteurs matériels, les phénomènes qui se passent dans l'éther entre les sources et les récepteurs étant, d'après la théorie même, inobservables.

changée : si τ est la période d'émission et τ' la période de réception, on a quand le récepteur se rapproche radialement de la source $\tau' = \frac{\tau}{1 + \beta}$, et quand il s'éloigne $\tau' = \frac{\tau}{1 - \beta}$. C'est l'*effet Doppler-Fizeau*.

Quand le récepteur est fixe et la source mobile : la *vitesse* n'est pas changée ; la *direction des rayons reçus* n'est pas changée ; seulement ces rayons font voir la source dans la direction où elle se trouvait au moment de l'émission, et cette direction n'est plus celle où elle se trouve actuellement, à moins qu'elle ne se meuve suivant la droite qui la joint au récepteur. C'est ce qu'on appelle en Astronomie l'*aberration planétaire* ; la fréquence, elle, est changée : si la source s'éloigne radialement à la vitesse u , la période de réception est $\tau' = \tau(1 + \beta)$; où $\beta = \frac{u}{c}$; et si elle se rapproche, $\tau' = \tau(1 - \beta)$. C'est un autre aspect de l'*effet Doppler*.

Enfin quand les deux corps sont mobiles tous les effets dont nous venons de parler sont produits simultanément et s'ajoutent.

Pour l'*effet Doppler*, son existence est établie ; mais dans le cas du double mouvement la différence entre le changement de fréquence calculé à partir des deux vitesses absolues et le changement calculé à partir du seul mouvement relatif demeure invérifiable, faute de précision dans les observations.

Au sujet de l'*aberration proprement dite*, dont les effets observables ne peuvent dépendre que des changements de direction de la vitesse de la Terre, les observations sont d'accord avec la théorie ; il en est de même de l'*aberration planétaire*.

En ce qui concerne les modifications de la vitesse de la lumière, dans le cas d'un récepteur mobile, l'*expérience* n'a pas permis de vérifier *directement* la théorie, parce que dans les conditions où on peut les effectuer les mesures de vitesse de la lumière ne sont pas assez précises.

b. — Considérons maintenant une source et un récepteur en mouvement par rapport à l'éther, mais au repos l'un par rapport à l'autre : un premier cas intéressant à signaler est celui où le mouvement commun est un mouvement de *rotation*. Alors, dit la théorie, les phénomènes ne seront pas les mêmes que dans le cas du repos absolu, et les dérogations à prévoir seront propor-

tionnelles au rapport $\frac{v}{c}$ de la vitesse linéaire de rotation des corps à la vitesse de la lumière. Des expériences réalisées par Harress, en 1912, et par Sagnac, en 1913, devaient vérifier l'exactitude des prévisions théoriques concernant l'influence de la rotation sur les phénomènes lumineux.

c. — Mais le cas le plus important est celui de deux corps au repos relatif dont le mouvement commun est une *translation r. et u.* par rapport à l'éther. C'est le plus important parce qu'il se trouve réalisé à très peu près dans la plupart de nos expériences *terrestres*, c'est-à-dire dans toutes celles où nous utilisons des sources et des récepteurs immobiles par rapport à notre globe. Il est vrai que la Terre fait un tour en 24 heures autour de son axe par rapport à l'éther ; mais la vitesse linéaire de rotation des corps terrestres, qui ne dépasse pas 465 mètres à la seconde, est ici négligeable relativement à la vitesse orbitale du globe, qui est de 30 kilomètres par seconde environ. Il est vrai aussi que la direction de cette vitesse orbitale change d'un jour à l'autre au cours de l'année : mais dans le temps très court que dure une expérience d'optique elle doit être regardée comme constante ⁽¹⁾. Dans ces conditions, on peut appliquer aux phénomènes de l'optique terrestre ce que la théorie prévoit pour l'optique d'un système en *translation r. et u.* dont la vitesse est d'environ 30 kilomètres par seconde. Cette grandeur de la vitesse a de l'importance, parce que les effets éventuels du mouvement se classent, dans la théorie, en deux catégories : ceux qui sont proportionnels au rapport $\beta = \frac{v}{c}$ de la vitesse du système à celle de la lumière (effets du *premier ordre* en β) et ceux qui sont proportionnels au carré $\beta^2 = \frac{v^2}{c^2}$ de ce rapport, ou à une puissance supérieure (effets du *second ordre* au moins en β). Or la vitesse de la Terre étant de 30 kilomètres par seconde et celle de la lumière de 300.000 kilomètres par seconde, le rapport $\frac{v}{c}$ vaut $\frac{1}{10\,000}$ et son carré $\frac{1}{100\,000\,000}$; d'où il suit

(1) Il faudrait tenir compte aussi pour évaluer la vitesse absolue de la Terre de la vitesse d'ensemble du système solaire ; cependant on peut dire que la vitesse totale de notre globe, tout en étant de ce fait variable d'une époque à l'autre de l'année, demeure toujours relativement peu différente de sa vitesse propre sur son orbite, si bien que tout compte fait on peut raisonner pour simplifier comme si cette vitesse orbitale existait seule.

que, s'ils devaient se produire, les effets du premier ordre seraient assez facilement décelables, tandis que les effets du second ordre le seraient beaucoup plus difficilement.

Cela étant, la théorie prévoit d'abord que dans un système en translation r . et u ., donc dans nos expériences d'optique terrestre avec sources et récepteurs au repos par rapport à la Terre, il n'y a pas d'aberration observable, en ce sens que la source est toujours vue dans la direction où elle se trouve ; ni non plus d'effet Doppler-Fizeau observable, parce que le changement de période dû au mouvement de la source est toujours exactement compensé par le changement de période dû au mouvement du récepteur ce dont l'expérience témoigne effectivement.

Par contre la théorie prévoit une influence du mouvement du système sur la vitesse relative de propagation de la lumière : en effet le mouvement de la source demeurant sans influence sur la vitesse absolue de la lumière émise, un récepteur terrestre éclairé par une source terrestre reçoit la lumière de cette source comme il recevrait celle d'une étoile fixe, c'est-à-dire avec une vitesse relative $c \pm v$, suivant qu'il va au-devant du rayon ou fuit devant lui. D'où une variation de la vitesse relative de la lumière suivant l'orientation de la droite source-récepteur par rapport à la vitesse du système. Si cette vitesse relative pouvait être mesurée d'après la longueur et la durée de parcours d'un trajet *simple*, ses différences suivant les directions seraient faciles à mettre en évidence ; mais nos procédés terrestres de mesure de vitesse de la lumière portent nécessairement sur des trajets *aller et retour*, si bien que, par suite d'une compensation partielle entre les variations de la vitesse dans les deux sens, la théorie classique ne prévoit qu'une différence du *second ordre* entre les vitesses aller et retour de deux rayons qui voyagent relativement au système dans deux directions différentes : et ici encore l'expérience est muette, parce que nos mesures directes ne peuvent absolument pas nous révéler des différences de cet ordre.

Cependant il existe d'autres prévisions théoriques : la plupart des phénomènes optiques, réflexion, réfraction, et surtout phénomènes d'interférences — les plus accessibles de tous aux mesures précises — dépendent de la vitesse de la lumière, ou mieux des différences de temps de parcours de plusieurs rayons qui, issus d'un même point, vont par plusieurs chemins se réunir en un autre

point commun. Or la théorie annonce que dans un système en translation r . et u . les formules auxquelles obéissent ces phénomènes ne peuvent jamais différer des formules correspondantes de l'optique absolue que par des termes du second ordre en β ou par des termes encore plus petits. Ajoutons que dans la théorie de Maxwell et dans la première théorie de Lorentz ce théorème général vaut non seulement pour les phénomènes lumineux mais aussi pour les phénomènes é. m., si bien que des expériences optiques ou é. m. où interviennent seulement des corps au repos par rapport à la Terre ne peuvent révéler le mouvement de la Terre tant qu'elles ne dépassent pas l'approximation du premier ordre en β ; pour révéler ce mouvement une précision atteignant au moins le *second ordre* est indispensable.

Pour soumettre au contrôle de l'expérience le théorème dont nous venons de parler, on pourrait en principe calculer les éléments d'un phénomène dans l'hypothèse du repos de la Terre, mesurer les mêmes éléments tels qu'ils se présentent dans la réalité, et évaluer la différence si elle se manifeste; mais il y a mieux à faire, du moins en Optique: toutes les expériences dont on peut attendre un résultat comportant des trajets lumineux, on peut faire voyager successivement les rayons dans des directions telles relativement à la vitesse de la Terre que cette vitesse influe en sens opposés, la première et la deuxième fois, sur le phénomène; d'où le double avantage d'avoir à comparer deux observations directes, et de rendre possible entre elles une différence théorique *doubleée*.

Le moyen le plus simple d'obtenir le changement de direction est d'ailleurs d'imposer aux rayons des trajets horizontaux; d'opérer autant que possible à des heures où la vitesse de la Terre au lieu de l'expérience est elle-même horizontale; de monter l'appareil optique sur un support mobile autour d'un axe vertical, et de faire varier son orientation par rapport à la vitesse de la Terre. De nombreuses expériences de ce genre furent instituées au cours du xixe siècle. Dans toutes celles qu'on fit avant 1881 la précision ne dépassait pas le premier ordre; aussi n'est-il pas étonnant que, à part une ou deux expériences reconnues depuis mal interprétées, les résultats aient été constamment négatifs, conformément au théorème que nous avons énoncé.

Néanmoins des effets du second ordre étaient toujours prévus,

et l'on cherchait des procédés d'observation plus précis pour les déceler. En 1881 Michelson imagina un moyen qui, d'après la théorie, devait mettre indirectement en évidence une différence en β^2 des valeurs de la vitesse aller et retour de la lumière suivant que les rayons voyageaient dans la direction de la vitesse v de la Terre ou dans une direction perpendiculaire. Voici le schéma de l'expérience (fig. 2). Deux rayons issus d'une même source S , puis séparés par une lame semi-transparente L , accomplissaient après leur séparation, et grâce à leur réflexion sur deux miroirs M_1 , et M_2 , deux trajets aller et retour égaux relativement à la Terre, et perpendiculaires entre eux ; puis étaient réunis par la lame, et venaient interférer en F ; de là le nom d'interféromètre donné à l'appareil ⁽¹⁾. On pouvait noter la position des franges d'inter-

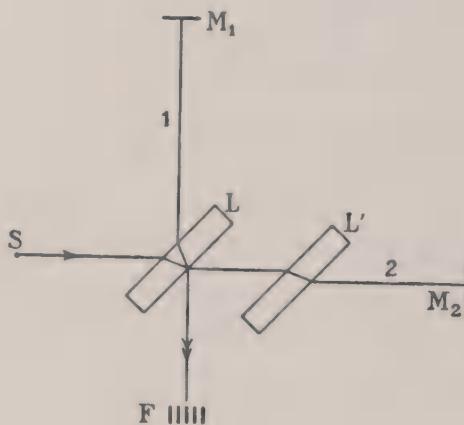


Fig. 2.

férence pour une orientation donnée de l'interféromètre, qui, par exemple, imposait au rayon n° 1 un parcours parallèle à v ; quand on faisait tourner l'appareil de 90° , c'était le rayon n° 2 qui voyageait parallèlement à v ; à la différence de temps de parcours par rapport au cas du repos qui correspondait d'après la théorie à la première orientation devait alors se

substituer une différence égale et opposée : d'où un effet différentiel doublé, qui devait se traduire par un certain déplacement des franges d'interférence quand l'appareil passait de la première orientation à la seconde.

Le calcul montrait que le dispositif était assez précis pour déceler le déplacement théorique prévu, bien que ce déplacement fût du second ordre. En fait l'effet attendu ne se produisit pas. Michelson recommença l'expérience en 1887, avec un appareil plus sensible : le résultat fut encore négatif ; et l'on fut bien obligé de reconnaître l'échec de la théorie classique sur le point en li-

⁽¹⁾ La lame L' est là pour imposer au rayon n° 2 des trajets dans le verre égaux à ceux du rayon n° 1.

tige : dans un système en translation $r.$ et $u.$ donc, les phénomènes optiques paraissaient se passer exactement comme dans un système au repos par rapport à l'éther ; autrement dit, et pour mieux rappeler les données du problème, dans un système en translation $r.$ et $u.$, la vitesse *aller et retour* de la lumière se révélait indépendante de la direction, tout comme dans le système absolu.

Dans le domaine de l'E. M., où certaines actions se propagent à une vitesse égale à celle de la lumière, les dérogations observables aux lois absolues ne devaient jamais atteindre non plus, avons-nous dit, le premier ordre en β ; et de fait les expériences terrestres d'E. M. ne révélèrent jamais d'effets de cet ordre. Mais un effet du second ordre fut déduit de la théorie : un condensateur formé de deux plateaux parallèles devait tendre de lui-même à s'orienter parallèlement à la vitesse de la Terre quand il lui était oblique. Trouton et Noble essayèrent, en 1903, d'obtenir cette rotation : ils n'y réussirent pas, et durent conclure de leur essai que le comportement d'un condensateur emporté dans le mouvement de la Terre était indépendant de son orientation dans le système, tout comme s'il se fût agi du système absolu.

Ainsi le mouvement de la Terre non seulement ne produisait aucun effet du premier ordre en β sur les phénomènes optiques ou é. m., premier résultat négatif prévu par la théorie classique, mais il ne produisait pas non plus d'effets du second ordre ; or ce nouveau résultat négatif était contraire aux prévisions de la théorie. Abstraction faite d'hypothèses relatives aux rapports de l'éther et de la matière et fertiles en difficultés, comme celle d'un entraînement par la Terre de l'éther circumterrestre, on pouvait essayer d'expliquer le fait par des phénomènes de *compensation* entre d'une part les différences *réelles* de vitesse de la lumière — ou des actions é. m. — suivant les directions, et d'autre part certaines modifications *réelles* des corps intéressés, supposées produites par leur mouvement même, et dépendant aussi de leur orientation par rapport à la vitesse de la Terre. C'est dans cette voie que s'engagea Lorentz, par son hypothèse fondamentale de la *contraction* des corps dans le sens de leur vitesse absolue et par les autres hypothèses qu'il dut ajouter à celle-là pour l'expliquer ou la compléter.

Mais on pouvait aussi induire des résultats négatifs des expériences ce postulat général que les lois de l'Optique et de l'E. M.

avaient été pour ainsi dire établies les mêmes dans tous les systèmes d'inertie, ce qui supprimait sous ce rapport toute différence entre les systèmes d'inertie mobiles et le système absolu, rétablissait la parité entre l'E. M. et la mécanique positive et dispensait d'expliquer par des modifications physiques se compensant les unes les autres l'absence d'influence du mouvement de la Terre. Et telle est la voie, opposée en ce sens à celle de Lorentz, où devait s'engager Albert Einstein en posant les bases de la théorie de la *Relativité restreinte*.

8. Principe de relativité et principe du mouvement relatif. — Le postulat dont nous venons de parler, à savoir que tous les systèmes d'*inertie* sont équivalents quant à l'applicabilité des lois fondamentales de l'Optique et de l'E. M. aussi bien que de la Mécanique, est connu sous le nom de *principe de Relativité* (¹).

Le principe de relativité donc, résolvait manifestement les problèmes posés par l'échec des expériences de Michelson et de Trouton et Noble. En effet, dans le système absolument fixe, les franges de l'interféromètre et les interactions des plateaux du condensateur auraient été indépendantes de l'orientation des appareils, faute d'un mouvement qui puisse privilégier dans le système une direction quelconque ; si donc la Terre était un système d'inertie équivalent au système absolu, les phénomènes observés devaient s'y révéler de même indépendants de l'orientation, ce qu'on avait observé en effet.

Mais le principe dépassait les exigences des expériences réalisées : Michelson, comme aussi Trouton et Noble, avaient opéré sur des corps *fixes* relativement à la Terre ; or le principe s'appliquait aussi à des phénomènes intéressant des couples de corps soit tous deux mobiles soit l'un fixe et l'autre mobile par rapport au système d'inertie adopté ; et dans ce cas encore il conduisait à dire que relativement à un système d'inertie quelconque ces

(¹) Observons qu'en droit le postulat plus général qui consisterait à proclamer l'équivalence pour l'étude des lois physiques de *tous* les systèmes de référence, *même accélérés*, mérirait seul le nom de principe de relativité sans restriction. Nous retrouverons cet autre postulat, sous forme équivalente, quand nous étudierons la théorie de la relativité généralisée. D'ici là nous entendrons par principe de relativité le postulat qui concerne les seuls systèmes d'inertie. Que s'il y avait danger d'équivoque, nous pourrions préciser en disant suivant l'occurrence principe *restreint* ou principe *général* de relativité.

phénomènes devaient paraître conformes aux lois du système absolu : d'où des divergences nouvelles par rapport aux résultats classiques. Prenons comme exemple l'influence du mouvement sur la fréquence de la lumière, influence qui, pour être observable, suppose un mouvement relatif de la source et du récepteur, c'est-à-dire, du point de vue absolu, une différence entre les vitesses absolues des deux corps. Considérons, en nous référant d'abord au système absolu Σ , deux corps pouvant jouer l'un par rapport à l'autre le double rôle de source et de récepteur, et qui soient l'un au repos dans Σ , par exemple une étoile supposée fixe, et l'autre lié à un système d'inertie mobile, par exemple un corps lumineux terrestre. Nous admettrons de plus que les deux corps émettent l'un vers l'autre des radiations de même période τ , et que la vitesse de la Terre, v , est dirigée vers l'étoile. D'après la théorie classique, toujours valable dans le système absolu, la période de réception τ' de la lumière émise par le corps mobile et *reçue sur l'étoile fixe*, a pour valeur, en fonction de la période d'émission τ et du rapport $\beta = \frac{v}{c}, \tau' = \tau(1 - \beta)$.

Référons-nous maintenant au système d'inertie constitué par la Terre, et demandons-nous quel sera *d'après le principe de relativité* le changement de période de la lumière émise par l'étoile et *reçue sur la Terre* : les phénomènes doivent se passer pour l'observateur terrestre comme tout à l'heure pour l'observateur absolu ; et ici encore il s'agit d'une source qui se rapproche du récepteur à la vitesse relative v : donc nous aurons toujours entre les deux périodes la même relation $\tau' = \tau(1 - \beta)$. Or ici la théorie classique prévoyait un autre changement de période exprimé par la relation $\tau' = \frac{\tau}{1 + \beta}$.

Des écarts analogues entre les formules classiques et les formules déduites du principe de relativité se remarquaient dans le cas de l'aberration, de la grandeur apparente de la vitesse de la lumière, etc. Seulement tandis que les résultats relatifs aux phénomènes étudiés par Michelson et par Trouton et Noble s'étaient manifestés par l'échec des expériences, les écarts dont nous venons de parler restaient dans le domaine purement théorique, faute d'expériences assez précises pour témoigner pour ou contre leur réalité ; et c'est en ceci que le principe de relativité outrepassait les indications positives immédiates. Ce principe risquait

donc de paraître plus qu'audacieux, surtout si l'on voulait en faire une sorte de postulat radical et nécessaire *a priori*. Par ailleurs il entraînait, comme nous le verrons, des conséquences vraiment révolutionnaires. Comment comprendre dans ces conditions qu'Einstein ait osé en faire l'assise d'une théorie nouvelle, et que cette théorie une fois élaborée ait été favorablement accueillie par de nombreux physiciens ?

L'explication, croyons-nous, repose en partie sur ce fait que le principe de relativité était conforme à une idée plus profonde, plus intelligible en apparence et au premier abord extrêmement séduisante : à savoir que tous les phénomènes physiques, optiques et é. m. aussi bien que mécaniques, intéressant deux corps donnés, au repos ou en mouvement l'un par rapport à l'autre, sont toujours indépendants des mouvements absolus de ces corps, si bien que quand ces phénomènes affectent deux corps au repos relatif ils sont les mêmes que si ces corps étaient au repos absolu ; et que s'ils supposent deux corps en mouvement l'un par rapport à l'autre ils dépendent seulement de ce mouvement relatif des corps intéressés.

On pourrait appeler cet autre postulat le *principe du mouvement relatif* ; principe qui joua sûrement un grand rôle dans la genèse des théories relativistes. Essayons d'en préciser le sens et d'en établir les rapports avec le principe de relativité.

D'abord, énoncé sans restrictions, le principe du mouvement relatif serait plus général que le principe de relativité tel que nous l'avons formulé⁽¹⁾ : en effet deux corps pouvant être au repos l'un par rapport à l'autre dans un même système accéléré, il conduirait à dire que dans ce cas aussi les phénomènes affectant les deux corps doivent obéir aux mêmes lois que si ces corps étaient au repos absolu. Or il n'en est pas ainsi en mécanique : relativement à un système en rotation par exemple, deux masses liées dynamiquement sont soumises à des effets centrifuges et ne se comportent pas comme dans un système d'inertie. De même le principe général du mouvement relatif exigerait que les effets centrifuges en question, attribuables selon la théorie classique

⁽¹⁾ S'il avait une portée universelle, il lui correspondrait, en ce qui concerne l'équivalence des systèmes de référence, le principe général de relativité auquel nous avons fait allusion.

à la seule rotation absolue du système de masses considéré, naissaient aussi bien du fait de la mise en rotation d'autres masses entourant les premières, celles-ci demeurant au repos : ce qui ne s'observe pas. Voilà pour la Mécanique. En ce qui concerne l'Optique et l'E. M. l'expérience était encore muette au début du xx^e siècle : cependant l'analogie inclinait à prévoir les effets de rotation que devaient bientôt révéler en Optique les expériences de Harress et de Sagnac.

Bref le principe du mouvement relatif paraissait inacceptable tel quel sous sa forme générale ; ceux qu'il avait pu séduire étaient donc contraints provisoirement — quitte à chercher ensuite un biais pour le généraliser —, de le restreindre selon les indications de la mécanique, c'est-à-dire de le restreindre au cas des mouvements relatifs $r.$ et $u.$

De fait, ainsi limité il pouvait être considéré comme une expression formelle exacte de certaines lois de la mécanique positive : on savait depuis Newton non seulement que quand deux corps sont au repos relativement à un même système d'inertie mobile leurs relations dynamiques sont les mêmes que s'ils étaient au repos absolu ; que par exemple les conditions d'équilibre d'un système de masses sont les mêmes dans un système d'inertie mobile que dans Σ ; mais aussi que lorsque deux corps sont animés de deux vitesses $r.$ et $u.$ différentes, et donc sont en mouvement $r.$ et $u.$ l'un par rapport à l'autre, seule leur vitesse relative intervient dans leurs relations dynamiques : c'est ainsi que dans le choc de deux masses les échanges de quantité de mouvement peuvent indifféremment s'exprimer en attribuant par exemple tout le mouvement à la première masse et le repos à la seconde, ou tout le mouvement à la seconde et le repos à la première.

Le principe du mouvement relatif restreint aux mouvements $r.$ et $u.$ était donc incontestable en mécanique pure, et c'était là un gros argument en sa faveur. Mais précisément, sous cette forme restreinte il entraînait l'équivalence de tous les systèmes d'inertie pour l'applicabilité immédiate des lois physiques, c'est-à-dire qu'il avait pour corollaire le principe de relativité. Pour s'en convaincre il suffit d'observer que la vitesse relative de deux corps, c'est-à-dire la différence entre leurs deux vitesses, est la même quand on se réfère à un système d'inertie mobile quelconque que quand on se réfère au système absolu ; or d'après

le principe du mouvement relatif cette vitesse relative est seule à intervenir dans la détermination des phénomènes : ceux-ci se passeront donc dans n'importe quel système d'inertie comme dans le système absolu, ce qui vérifie le principe de relativité. Quant à leurs conséquences donc, les deux principes étaient *équivalents* (¹) ; et la faveur dont jouissait à tort ou à raison le principe du mouvement relatif ne pouvait que profiter au principe de relativité lui-même.

Etait-il possible, maintenant, d'étendre à l'Optique et à l'E. M. le principe du mouvement relatif ? Les classiques n'avaient pu y songer, puisque justement leurs théories faisaient intervenir les mouvements absous dans la détermination des phénomènes : on se rappelle que la vitesse de la lumière, l'aberration et l'effet Doppler dépendaient toujours des vitesses absolues soit des sources soit des récepteurs. Mais les expériences nouvelles avaient changé l'aspect de la question : elles avaient montré que les phénomènes optiques et é. m. affectant deux corps fixes par rapport à la Terre se passaient comme si ces corps avaient été au repos absolu ; et ce fait était conforme au principe du mouvement relatif. A vrai dire il n'y avait pas d'autre fait positif à invoquer en faveur du principe ; mais il n'y en avait pas non plus à invoquer contre lui : d'après ce que nous avons dit, les données expérimentales concernant l'effet Doppler n'impliquaient pas plus — faute de précision — une influence des deux vitesses absolues de la source et du récepteur qu'une influence de leur seule vitesse relative ; et des conclusions analogues s'imposaient au sujet de l'aberration et de la grandeur de la vitesse de la lumière. Il en était de même en E. M. Pour certains phénomènes intéressant un couple de corps l'un fixe et l'autre mobile la théorie attribuait bien des effets différents aux mouvements des deux corps ; mais cette différence ne concernait que des actions sous-jacentes et par là

(¹) Nous parlons d'équivalence, non d'identité. De fait on peut concevoir, à la manière de Lorentz-Poincaré, que les mouvements absous des corps modifient séparément plusieurs grandeurs physiques, mais de telle manière que ces modifications se compensent, et que dans les systèmes d'inertie mobiles les phénomènes *paraissent* toujours les mêmes que dans le système absolu. On aurait affaire alors à une relativité de fait que d'un point de vue formel on pourrait ériger en « principe de relativité ». Cependant les phénomènes n'obéiraient pas au principe du mouvement relatif puisqu'en eux-mêmes ils dépendraient des mouvements absous.

inobservables et les phénomènes observables étaient les mêmes. Ainsi la rotation relative d'un aimant et d'un conducteur crée un courant dans le conducteur ; mais en dépit de la différence théorique des processus suivant que c'est l'aimant qui tourne ou le conducteur l'observation révélait dans les deux cas des courants identiques.

Bref sur le terrain de l'expérience rien n'interdisait, et plusieurs faits suggéraient, l'extension à toute la physique du principe du mouvement relatif. Mais sur le terrain de la théorie se dressait le gros obstacle que voici : tandis qu'en mécanique les vitesses absolues des deux corps considérés interviennent toujours de façon *symétrique* dans la détermination des phénomènes, en conséquence de quoi leur différence, c'est-à-dire la vitesse relative des deux corps, entre seule en ligne de compte, une pareille symétrie des influences n'existe pas en Optique ni en E. M., du moins selon la conception classique : nous avons vu en effet que la vitesse de propagation de la lumière dépendait de la vitesse du récepteur, mais pas de celle de la source ; et que la direction apparente des rayons ne dépendait pas de la même façon du mouvement des deux corps, non plus que les modifications de la période : d'où la nécessité de tenir compte séparément des deux vitesses absolues. Cette *dissymétrie* dans l'influence des deux vitesses rendait donc difficile l'extension du principe du mouvement relatif, et par suite du principe de relativité, à l'Optique et à l'E. M.

Nier la dissymétrie — laquelle en fait se rattachait à la théorie de l'éther —, et avant tout *faire dépendre la vitesse de propagation de la lumière de la vitesse des sources*, comme la vitesse absolue d'un obus dépend de celle du canon, était une solution ; solution d'autant plus admissible que vers 1900 beaucoup avaient cessé de croire à l'existence d'un éther réel. En fait ce n'est pas cette solution qu'adopta Einstein : il voulut conserver la dissymétrie entre l'influence du mouvement des sources et celle du mouvement des récepteurs : dès lors il lui fallait trouver une autre hypothèse qui compensât la dissymétrie conservée et la rendit compatible du même coup avec les deux principes.

Nous dirons bientôt en quoi consistait l'hypothèse d'Einstein ; et quels bouleversements elle introduisait jusque dans les concepts fondamentaux de la Physique. Mais ce que nous entendons sou-

ligner ici c'est que ces bouleversements — on s'en rendra compte plus loin — étaient de nature, en eux-mêmes, à faire reculer l'esprit le plus téméraire. Pour les admettre il fallait être pénétré de la valeur de quelque grande idée générale qui les exigeât, qui fût moins formelle et plus intelligible que le simple principe de relativité, et qui pût passer même pour la racine profonde de ce principe. Or c'est précisément le principe du mouvement relatif qui — notre exposé le montrera — servit à Einstein d'idée directrice et de vérité première dans l'établissement de toute la doctrine relativiste ; et c'est pourquoi nous avons tenu dès cette introduction à lui accorder toute la place qui lui revient à côté et au-dessus du principe de relativité proprement dit. Mais ce principe directeur, Einstein eut-il à l'inventer ? ou le trouva-t-il préexistant à ses propres réflexions ? Nous allons voir que le principe du mouvement relatif avait été entrevu, et même nettement formulé, avant les premiers travaux d'Einstein ; et qu'il se rattachait à une certaine conception relativiste non seulement des effets du mouvement, mais du mouvement lui-même, qui depuis longtemps flottait plus ou moins explicite dans beaucoup d'esprits. C'est ici précisément que nous allons rencontrer les racines *philosophiques* des théories de la relativité.

9. Quelques critiques pré-relativistes de l'idée de mouvement absolu. — De tout temps il s'est rencontré des philosophes pour proclamer la « relativité du mouvement », en ce sens qu'on ne peut *percevoir* que des mouvements de corps relativement à d'autres corps. Mais cette thèse banale n'a pas grande portée par elle-même ; car l'important est de savoir si elle entraîne ou non l'inexistence dans l'ordre objectif de tout mouvement absolu parmi les mouvements relatifs perceptibles ; du reste une réponse *a priori* à cette dernière question, ou même une réponse fondée sur une théorie incomplète ou périmée des mouvements physiques, ne présenterait pas non plus ici grand intérêt. S'il est facile en effet d'affirmer dans l'abstrait qu'il n'y a que des mouvements relatifs des corps par rapport à d'autres corps, il est beaucoup plus difficile de mettre sur pied un système du monde où cette thèse abstraite ne soit point contredite : *Descartes*, à ne lire que sa définition théorique du mouvement, pourrait passer pour l'ancêtre le plus authentique des relativistes : en

réalité — nous l'avons montré ailleurs — il n'y eut pas de partisan plus avéré des mouvements absolus. *Leibniz* aussi passerait aisément pour hostile à l'idée de mouvement absolu : les passages en faveur de la relativité du mouvement abondent dans ses œuvres (¹). Pourtant nous le voyons insister dans d'autres passages sur la distinction entre le mouvement comme phénomène — lequel se présente en effet comme essentiellement relatif — et la réalité profonde, ou la cause, du mouvement, dont la considération permet de discerner parmi les mouvements observables les mouvements vrais (²) ; et cette opposition, qui équivaut, sur le plan philosophique, à notre distinction entre cinématique et dynamique, donne à penser que si au lieu de disserter sur le mouvement dans l'abstrait, ou simplement en passant, il avait eu à édifier une théorie d'ensemble des mouvements de tous les corps, *Leibniz* aurait peut-être, lui aussi, substitué l'absolutisme d'un système du monde au relativisme de ses formules.

D'ailleurs on conçoit mal que *Descartes*, et même *Leibniz*, étant données leurs idées sur la mécanique, aient pu exercer un rôle quelque peu important dans la genèse même lointaine des théories de la relativité : si nous voulons trouver à *Einstein* des précurseurs nous devons les chercher sans doute parmi les *newtoniens*, parmi ceux du moins qui connaissaient et admettaient quant à ses principes les plus incontestables la mécanique de *Newton* ; et encore sommes-nous obligé d'ajouter ceci : dans le nombre des relativistes avant la lettre dont nous allons parler, il en est probablement qui ont été lus ou entendus par le créateur des théories de la relativité et qui ont pu ainsi influencer directement sa pensée ; et peut-être aussi quelques autres dont il n'a rien pu recevoir parce qu'il les ignorait. Le départ entre les deux groupes serait instructif au point de vue historique ; mais faute de renseignements nous ne tenterons pas de le faire.

(¹) Par exemple : *Specimen dynamicum*. Partie II. VI, cité par L. Brunschvicg : *L'expérience humaine et la causalité physique*, 1 vol. Paris 1922, p. 220. Et *Lettres entre Leibniz et Clarke. Cinquième écrit de M. Leibniz* sur le § 13. N° 52. Œuvres de *Leibniz*, éd. Jacques. Paris, 1842. 2^e série, p. 459.

(²) Par exemple : *Discours de métaphysique*, 1686, § 18. Et *Système nouveau de la Nature...* Journal des Savants. Juin 1695. Cités par L. Brunschvicg, *Ibidem*, p. 220 et 221 (note).

Au surplus la rencontre d'une même thèse chez deux hommes qui n'ont pas pu s'influencer présente à tout le moins cet intérêt qu'elle est l'indice de réactions identiques de l'esprit critique en face de difficultés théoriques analogues.

Boscovich est le premier nom qui paraît devoir retenir ici notre attention : nous avons essayé de montrer ailleurs comment la conception des centres de force ponctuels admise par le jésuite physicien non seulement présupposait le dynamisme newtonien, mais en était pour ainsi dire — en droit — l'achèvement logique parfait. Or quand il établit sa théorie générale de l'espace, du temps et du mouvement, nous voyons *Boscovich* affirmer on ne peut plus nettement que tout mouvement dont nous pouvons parler est relatif en ce sens que nous pouvons toujours l'interpréter comme un repos du mobile accompagné d'un mouvement opposé du repère ⁽¹⁾. Certes, si cette thèse n'était formulée que du point de vue cinématique, elle serait vraie ; mais *Boscovich* l'énonce sans restriction ; et même il l'étend aux rotations, à celle de la Terre en particulier ⁽²⁾, rotations que leurs effets d'inertie nous interdisent, d'après Newton lui-même, de remplacer par un mouvement corrélatif du système de référence. Nous ne pouvons pas nous arrêter autant qu'elle le mériterait à la doctrine de *Boscovich* ; mais nous pouvons dire qu'elle nous paraît profondément relativiste : relativiste du moins en ce sens qu'elle réduit non pas la réalité en soi, mais l'objet de notre physique, à un système de déplacements relatifs des corps et de rapports mesurables entre les longueurs, les durées et les masses ; qu'elle exclut toute possibilité pour nous de passer des mesures ou des mouvements relatifs à des grandeurs ⁽³⁾ ou à des mouvements absous ; et qu'elle tend à voir dans le mouvement réel d'un corps, à chaque instant, la résultante des relations de ce corps avec tous les autres corps de l'Univers ⁽⁴⁾.

Encore une fois il ne faudrait pas faire de *Boscovich* un positiviste réduisant tout le réel à l'observable ; mais en ce qui concerne notre connaissance du monde physique il nous paraît être

⁽¹⁾ Voir les textes cités par D. Nedelkovitch : *La philosophie naturelle et relativiste* de R. J. *Boscovich*. 1 vol. Paris, 1922. p. 80-87.

⁽²⁾ *Ibidem*, p. 71.

⁽³⁾ *Ibidem*, p. 67-80.

⁽⁴⁾ *Ibidem*, p. 86.

un précurseur authentique, et peut-être le premier en date, de ce relativisme que nous allons retrouver chez Mach, en attendant de le voir s'épanouir chez Einstein en une théorie cohérente (¹).

Nous avons résumé autre part la doctrine de *Kant* sur la réalité du mouvement. Pour lui bien entendu un mouvement physique ne saurait être qu'un mouvement observable ; mais tous les mouvements observables ne sont pas réels au même titre : seuls peuvent être qualifiés de réels les mouvements de rotation, à cause des effets d'inertie qui les accompagnent ; les mouvements r. et u. au contraire ne peuvent être dits réels, parce qu'ils sont indiscernables des mouvements corrélatifs de l'espace empirique qui sert à les définir (²) : c'est l'équivalent de la théorie newtonienne, quand on la restreint à l'interprétation des données immédiates. Kant d'ailleurs dépasse ce point de vue exclusivement positif quand il admet que la hiérarchie des espaces — nous dirions des systèmes de référence — qu'on est conduit à regarder comme mobiles les uns par rapport aux autres quand on veut définir un mouvement résultant donné, a pour terme *idéal* un espace absolu (³).

Et tout ceci évidemment Kant n'est rien moins que relativiste. Mais on peut penser qu'il a indirectement préparé les voies à la doctrine de la relativité en ce sens que par sa théorie générale de la science il excluait du domaine de la physique toute donnée qui n'est pas objet d'expérience ; c'était en exclure tout mouvement absolu, puisque de l'avis de tous un mouvement absolu ne saurait se percevoir comme tel (⁴).

Ernst Mach, physicien et historien de la physique, s'est fait

(¹) Le relativisme de Boscovich a été fortement souligné par M. Nedelkovitch dans l'ouvrage auquel nous venons de renvoyer le lecteur. Mais nous croyons que ses conséquences en dynamique pourraient faire l'objet d'une étude spéciale plus approfondie et surtout mieux systématisée.

(²) E. Kant : *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*. Trad. Andler et Chavannes, 1 vol. Paris, 1891, ch. iv, scolie général. p. 92.

(³) Kant, *Ibidem*, p. 91.

(⁴) Kant pourrait passer pour avoir de loin ouvert les voies à Einstein d'une autre manière encore : en faisant du temps comme de l'espace une forme *a priori* de la sensibilité il rendait éventuellement plus acceptable la substitution d'un temps variable suivant les observateurs au temps classique universel : or la théorie de la relativité comportera précisément, comme nous le verrons, la double négation du mouvement absolu et du temps absolu.

dans de nombreux travaux le défenseur d'une conception purement positiviste de la science, qui tend à réduire tous nos énoncés de lois à des relations entre des grandeurs immédiatement observables, à bannir par conséquent de nos théories tout élément transcendant à l'expérience. En 1883, dans la première édition de son ouvrage *Die Mechanik in ihrer Entwicklung, historisch-critisch dargestellt*, il essaya d'introduire cette conception positiviste dans le domaine de la mécanique ; et dans les éditions suivantes il maintint sa thèse malgré les objections qui lui venaient de nombreux côtés⁽¹⁾.

Le positivisme de Mach entraînait en mécanique d'abord l'élimination du temps, de l'espace et du mouvement absous ; ensuite une présentation expérimentale des vérités que ces concepts pouvaient recouvrir ou plutôt, selon Mach, idéaliser.

Mach n'a pas de peine à établir que nous n'avons aucune intuition empirique du temps absolu, et que notre temps physique — temps mesuré en fait par la rotation de la Terre — est simplement l'un des éléments de notre reconstruction de l'ensemble du monde⁽²⁾. C'est dire équivalement que nous ne connaissons que par une vaste induction l'égale durée des jours sidéraux, et que cette hypothèse tire toute sa valeur de la simplicité — ou mieux de l'intelligibilité — des théories qu'elle permet de construire. Seulement, au lieu d'admettre au delà du temps mesurable un temps réel, concevable bien que transcendant à l'expérience, Mach le nie.

Il nie avec autant de force l'espace absolu et le mouvement absolu ; et l'histoire de la mécanique lui fournit le moyen de les remplacer, c'est-à-dire lui révèle les systèmes de référence concrets par rapport auxquels s'énoncent les lois du mouvement. En fait, dans les expériences de Galilée les mouvements étaient rapportés à la Terre, et c'est relativement à la Terre que se formula d'abord la loi d'inertie, comme c'est par rapport à la Terre que se vérifient encore pour nous la plupart des lois de la mécanique expé-

(1) Une quatrième édition parut en 1903. C'est d'après cette édition que fut faite la traduction française de E. Bertrand à laquelle nous nous référons. E. Mach : *La Mécanique. Exposé historique et critique de son développement.* 1 vol. Paris, 1904.

(2) E. Mach. : *La Mécanique*, trad. E. Bertrand, ch. II, 2. p. 220.

mentale (¹). Quant aux mouvements des astres, Newton les expliqua en les rapportant à l'ensemble des étoiles fixes ; et le ciel des étoiles fixes est encore le seul système de référence par rapport auquel nous ayons le droit d'affirmer la validité des lois de la mécanique : en dire davantage, déclare Mach, est un acte de mauvaise foi scientifique (²).

Le double tort de ceux qui croient à l'espace absolu est de réaliser une idée, et d'étendre à tout l'Univers ce qu'on n'a vérifié que dans d'étroites limites. Maintenant — et c'est ici la partie constructive du travail de Mach — si l'on veut donner un sens acceptable à l'« espace », on peut l'identifier avec l'ensemble des corps existants : c'est, pour Mach, non seulement par rapport à eux, mais à cause d'eux, sous leur influence, que les corps terrestres se comportent comme ils le font. Qu'arriverait-il s'il n'y avait plus d'étoiles ? Les partisans de l'espace absolu répondent que rien ne serait changé à notre mécanique terrestre ; Mach, lui, dit que de science positive il n'en sait rien (³). Et c'est pourquoi il refuse la conclusion que Newton tirait d'une expérience faite pour établir le caractère absolu des rotations. Newton (⁴) avait suspendu un seau à une corde et tordu la corde de façon qu'en se détordant elle puisse entraîner le seau dans un mouvement rapide de rotation ; puis ayant mis de l'eau dans le seau il avait laissé la corde se détordre : l'eau n'étant pas tout de suite entraînée dans le mouvement du seau garda d'abord sa surface libre horizontale ; mais peu à peu elle participa au mouvement du seau, et alors sa surface se creusa, et d'autant plus fort que la vitesse de rotation de l'eau devenait plus proche de la vitesse de rotation du seau. Or, dit Newton, quel est le mouvement qui creuse la surface de l'eau, c'est-à-dire qui produit des effets centrifuges ? Ce n'est pas le mouvement relatif du seau par rapport à l'eau, puisqu'il existe seul au début, où ces effets n'existent pas encore, et qu'il va se ralentissant ensuite à mesure que ces effets se développent ; c'est uniquement le mouvement circulaire vrai de l'eau et du seau par rapport à l'espace absolu. On peut donc distinguer une rotation

(¹) *Ibidem*, ch. II, VI, 6. p. 226.

(²) *Ibidem*, ch. II. VI, 6. p. 226.

(³) *Ibidem*, ch. II. VI, 9. p. 230.

(⁴) Newton : *Philosophiae Naturalis principia mathematica*. 1 vol. Londini, 1726. *Definitiones* : *scolium*, p. 10.

absolue de la rotation relative opposée par les effets centrifuges qui accompagnent la première et pas la seconde.

Mach interprète autrement l'expérience : c'est, dit-il, par rapport aux étoiles que l'eau tourne et c'est par rapport à elles, ni plus ni moins, qu'a lieu la rotation qualifiée par Newton d'absolue. Mais Mach va plus loin : c'est peut-être, dit-il, sous l'influence même des étoiles que se produisent les effets centrifuges observés. Alors ces effets manifesteraient simplement les interactions entre corps terrestres et corps célestes, et ces interactions pourraient très bien ne dépendre que des mouvements *relatifs* entre ces groupes de corps.

En tout cas on ne peut pas prévoir *a priori* ce que donnerait l'expérience de Newton sans la présence des étoiles ; et d'autre part aucun fait n'interdit de penser que si l'on arrivait à faire tourner les étoiles en laissant l'eau immobile les mêmes effets centrifuges se manifesteraient. Newton triomphe trop vite en montrant que la rotation des parois du seau par rapport au liquide n'a pas creusé sa surface : c'est peut-être parce qu'elles étaient trop peu massives ; et la rotation autour de l'eau d'un corps épais de plusieurs lieues aurait peut-être donné un résultat positif⁽¹⁾ ; si bien qu'on pourrait alors attribuer les effets centrifuges à la rotation relative dès qu'elle existe ; ce serait conforme au postulat positiviste qui interdit même de parler de deux rotations, puisque pour l'expérience il n'y a pas de différence entre elles⁽²⁾.

Jamais théoricien de la mécanique n'avait poussé si loin, sans doute, la thèse de la relativité du mouvement. A vrai dire Mach ne peut aller ainsi jusqu'au bout de son relativisme qu'en abandonnant son positivisme, et qu'en risquant à son tour la formidable hypothèse de l'équivalence des deux rotations relatives qui correspondent, cinématiquement, à une seule rotation classique réelle. Sans cette hypothèse, en effet, il aurait dû reconnaître aux étoiles le privilège de la fixité, ce qui l'eût ramené à une autre forme d'absolutisme. Aussi avance-t-il qu'on pourrait établir une théorie des effets centrifuges qui les rattacherait aux seules rota-

⁽¹⁾ Mach : *La Mécanique*, trad. Bertrand, ch. II, VI, 5. p. 225.

⁽²⁾ *Ibidem*, ch. II, VI. 9 p. 231. Mach cependant a distingué constamment dans ce qui précède les deux rotations : ce ne peut être qu'en considérant celui des deux corps qu'on a dû lancer pour produire la rotation relative ; mais il reste vrai qu'après le lancement il n'y a plus de différence observable possible.

tions relatives (¹). Il n'essaie pas de l'établir : car théorie voudrait dire ici ensemble de relations précises entre les effets d'inertie d'une part et d'autre part la grandeur des masses en présence, leur distance et les éléments cinématiques de leurs mouvements relatifs ; et c'est ce qui ne paraît pas facile à concevoir : Mach pourtant regarde la tâche comme réalisable. Son postulat exigeait aussi, logiquement, l'élimination de la force, car la force est encore une de ces entités qu'on ne saurait observer et qui est liée à une théorie absolutiste du mouvement. Or voici comment il termine sa critique des principes newtoniens : « Il n'est pas impossible « qu'un jour les lois intégrales (pour employer une expression « de C. Neumann) remplacent les lois élémentaires qui consti- « tuent la mécanique actuelle, et que nous puissions avoir ainsi « une connaissance directe de la dépendance réciproque des posi- « tions des corps. Alors le concept de force sera devenu su- « perflu (²) ».

Donc plus de lois élémentaires applicables comme la loi de Newton à deux corps isolés ; plus de forces liant deux à deux tous les corps de l'Univers ; mais à chaque instant une détermination du mouvement de chacun des corps existants par l'ensemble de ses relations spatiales avec tous les autres corps au même instant, cela suivant des formules où s'intègreraient toutes les influences subies par le corps étudié de la part de tous les autres : tel est selon Mach le programme lointain d'une mécanique vraiment relativiste. En bannissant de sa conception du monde toute idée d'un mouvement absolu, en remplaçant même l'espace absolu dans son rôle de repère par la totalité des corps existants, Mach n'avait fait que se ranger dans la lignée nombreuse des pré-relativistes par négation. En établissant le programme positif d'une mécanique radicalement relativiste, d'une mécanique, surtout, où les effets dynamiques attribués jusque-là aux mouvements absolus ne dépendraient plus que des mouvements des corps les uns par rapport aux autres, il prenait à son compte dans toute son intransigeance le postulat que nous avons appelé *principe du mouvement relatif*, et il devenait ainsi à un titre, très spécial le précurseur d'Einstein ; car, nous le verrons, c'est un programme

(¹) *Ibidem*, ch. II, VII, 7, p. 250.

(²) *Ibidem*, ch. II, VII, 7, p. 250.

analogue à celui de Mach qu'Einstein devait s'efforcer de remplir dans sa théorie de la relativité généralisée.

Telles étaient les idées qu'avait inspirées à Mach son étude historique et critique du développement de la mécanique. Par comparaison avec ce projet hardi et positif d'une mécanique totalement conforme au principe du mouvement relatif, les affirmations prérelativistes que nous pourrions relever ici ou là dans beaucoup d'autres ouvrages de critique des sciences de la fin du xixe siècle nous paraîtraient, pour la plupart, timides ou trop vagues. Nous ne nous y arrêterons pas. Par contre nous allons montrer qu'à la même époque la conception relativiste du mouvement avait gagné du terrain chez les physiciens eux-mêmes.

La plupart des physiciens de la fin du xviii^e siècle et du début du xix^e admettaient volontiers des mouvements absolus, qu'ils rapportaient soit comme Newton à l'espace, soit comme Fresnel et ses successeurs à un système de référence lié à l'éther et qu'on pouvait croire absolument privilégié. Peu à peu cependant — il serait intéressant de savoir sous quelles influences, mais nous ne pouvons nous attarder à ce problème d'histoire — peu à peu on en vint, dans les milieux où l'on s'occupait de physique expérimentale ou théorique, à regarder le mouvement absolu comme une chimère sinon comme une absurdité.

— Dès 1874 *E. Mascart* nous fournit un témoignage non équivoque de cet état d'esprit. Ayant repris l'étude de l'influence du mouvement sur les phénomènes lumineux, il discutait la portée d'une expérience d'Arago sur la réfraction de la lumière dans un prisme mobile : cette expérience faite avec la lumière d'une étoile devait, en bonne théorie, manifester le mouvement de la Terre par rapport à l'étoile, le changement de période dû à l'effet Doppler équivalant à un changement d'indice du prisme ; mais Arago et Fresnel, dans leur ignorance de l'effet Doppler, avaient trop vite admis et cru trop vite expliquer le résultat négatif de l'expérience, laquelle en fait n'avait pas été assez précise. Or Mascart, avant de rétablir la théorie exacte de l'expérience, apporte à l'encontre de l'interprétation de ses prédécesseurs ce curieux argument *a priori* que si l'expérience faite avec la lumière d'une étoile fixe donnait réellement un résultat négatif, faite avec une lumière terrestre elle devrait donner un résultat positif qui manifesterait le mouvement *absolu* de la Terre ; et que faite avec la lumière

solaire à diverses époques de l'année elle pourrait même révéler le mouvement *absolu* du système solaire. « Sans nous égarer, écrit Mascart, à suivre de pareilles conséquences, examinons l'expérience d'Arago en elle-même... »⁽¹⁾

On voit que pour Mascart l'idée d'une expérience qui mettrait en évidence le mouvement *absolu* d'un astre est totalement inadmissible. Et ce qu'il y a de plus significatif, c'est qu'il s'agit d'une expérience d'optique, dont les résultats supposés positifs n'auraient révélé en définitive que des mouvements par rapport à l'éther, plus faciles certes à concevoir que les mouvements par rapport à l'espace. Mascart ne fait pas la distinction, comme s'il ne croyait pas plus à l'éther qu'à l'espace *absolu*. Nous avons parlé ailleurs des expériences multiples de Mascart relatives à l'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux terrestres : expériences dont les résultats furent toujours négatifs ; et nous avons dit qu'il eût fallu, pour les interpréter sage-ment, tenir compte de leur degré de précision : Mascart ne le fait point, et il termine son travail par ces lignes révélatrices : « La « conclusion générale de ce mémoire serait donc... que le mouve- « ment de translation de la Terre n'a aucune influence appré- « ciable sur les phénomènes d'optique produits avec une source « terrestre... ; que ces phénomènes ne nous donnent pas le moyen « d'apprécier le mouvement *absolu* d'un corps et que les mouve- « ments *relatifs* sont les seuls que nous puissions atteindre »⁽²⁾. Et c'est lui qui souligne les mots *absolu* et *relatifs*, comme pour mieux marquer ses convictions anti-absolutistes. Sept ans donc avant la fameuse expérience de Michelson, Mascart, relativiste avant l'heure, aurait probablement prédit que l'expérience ne donnerait rien.

— *Henri Poincaré* a-t-il recueilli l'écho des idées dont Mascart vient de nous fournir l'expression ; ou bien a-t-il été influencé surtout par l'échec inattendu de l'expérience de Michelson ? A la vérité l'échec de l'expérience a pu renforcer chez lui un anti-absolutisme préconçu. Toujours est-il que maintes fois, même dans

⁽¹⁾ E. Mascart : *Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur (II^e partie)*. Annales scientifiques de l'École Normale Supérieure. 2^e Série. T. III (1874), p. 375.

⁽²⁾ *Ibidem*, p. 420.

ses écrits antérieurs à la théorie de la relativité, il affirme son scepticisme au sujet du mouvement absolu.

Dans ses leçons sur l'Electricité et l'Optique, du moins dans la seconde édition qui date de 1901, il se réfère aux résultats des expériences pour écrire : « il est impossible de rendre manifeste « le mouvement absolu de la matière, ou mieux le mouvement « relatif de la matière pondérable par rapport à l'éther ; tout ce « qu'on peut mettre en évidence, c'est le mouvement de la ma- « tière pondérable par rapport à la matière pondérable » (¹). C'est là ce que nous avons appelé le principe du mouvement relatif : notons cependant que la formule générale qu'en donne ici Poincaré doit dépasser sa pensée, puisque prise telle quelle elle exclurait toute influence d'un mouvement absolu quelconque, même accéléré, sur les phénomènes lumineux. En fait le contexte montre que Poincaré n'entend appliquer le postulat que dans les limites indiquées par les expériences, c'est-à-dire seulement pour exclure tout phénomène dépendant d'un mouvement absolu r. et u. des corps intéressés.

Ainsi limité, le postulat du mouvement relatif se ramène à celui de l'équivalence de tous les systèmes d'inertie pour l'applicabilité des lois de l'Optique et de l'E. M., c'est-à-dire au principe restreint de relativité. Or ce principe est affirmé par Poincaré plusieurs fois dans *La Science et l'Hypothèse* (1902) et dans *La Valeur de la Science* (1905). Le grand mathématicien le présente ici non plus comme la conclusion de toutes les expériences négatives déjà faites pour découvrir une influence du mouvement de translation de la Terre, mais plutôt comme une anticipation concernant toutes les expériences futures analogues (²). On peut se demander d'où pouvait lui venir la conviction avec laquelle il écartait ainsi toute possibilité de trouver un phénomène dépendant du mouvement absolu des corps terrestres : il n'y a guère d'autre réponse que celle-ci, c'est qu'il regardait le mouvement absolu lui-même comme un non-sens.

De fait au chapitre VI de *La Science et l'Hypothèse*, voulant

(¹) H. Poincaré : *Electricité et Optique*, 2^e édition, 1 vol. Paris, 1901 (4^e partie), p. 613.

(²) H. Poincaré : *La Science et l'Hypothèse*, 1 vol. Paris, 1902. 4^e partie, ch. x, p. 201 ; *La Valeur de la Science*, 1 vol., Paris, 1905. 2^e partie, ch. vii, p. 176 et ch. viii, p. 185-190.

mettre en évidence la part de convention qui entre dans nos théories de la mécanique, il proclame d'emblée qu'il n'y a pas d'espace absolu, et que « nous ne concevons que des mouvements relatifs »⁽¹⁾ ; et ici la thèse est générale, puisqu'elle va conduire Poincaré, dans le chapitre suivant, à nier le caractère absolu des rotations elles-mêmes, en dépit des effets d'inertie qui les accompagnent ; à montrer qu'on pourrait très bien expliquer ces effets d'inertie par des forces réelles identiques aux forces d'inertie que la mécanique regarde comme fictives ; à écrire enfin sa fameuse formule, qui présuppose il est vrai une mécanique limitée aux phénomènes terrestres : « ces deux propositions « la Terre tourne » et « il est plus commode de supposer que la Terre tourne » ont un « seul et même sens : il n'y a rien de plus dans l'une que dans « l'autre »⁽²⁾.

Dans *La Valeur de la Science*, pour couper court aux commentaires qu'avait suscités cette formule, Poincaré explique sa pensée : il reconnaît que la thèse de la rotation de la Terre est plus vraie que la thèse de sa fixité, en ce sens qu'elle seule rend possible une explication cohérente de multiples phénomènes tant cosmiques que terrestres ; il accorde même à cette thèse, en tant qu'elle rend compte simplement de nombreux phénomènes, le même degré de certitude qu'à la thèse de l'existence des objets extérieurs (en tant qu'elle nous permet d'expliquer nos sensations à tous et leur harmonie)⁽³⁾. Mais il a bien soin de maintenir le point qu'il tient pour essentiel : l'inexistence de l'espace absolu⁽⁴⁾.

Aurait-il avoué, en conséquence, que *tourner*, pour un système matériel, n'a pas de sens cinématique, et veut dire seulement être le siège de certains effets dynamiques intérieurs, et d'ailleurs mystérieux ? Ou bien aurait-il dit, pour garder au mot rotation son sens obvie, que le repère par rapport auquel la Terre tourne ou ne tourne pas, — car alors il en faut bien un, — est constitué par l'ensemble des étoiles, en quoi il eût rejoint la conception de Mach ? En tout cas Poincaré, c'est ce que nous voulons souligner ici, se montre dans ses études de critique des sciences radicalement anti-absolutiste, en ce sens que, niant franchement toute idée d'un

⁽¹⁾ H. Poincaré : *La Science et l'Hypothèse*, III^e partie, ch. vi, p. 111.

⁽²⁾ *Ibidem*, ch. vii, p. 141.

⁽³⁾ H. Poincaré : *La Valeur de la Science*, III^e partie, ch. xi, 7, p. 272.

⁽⁴⁾ *Ibidem*, p. 273.

espace absolu, il nie la concevabilité d'un mouvement par rapport à cet espace, et *a fortiori* la possibilité de mettre en évidence un tel mouvement, fût-ce par ses conséquences ; et qu'il refuse, même, de croire, en Optique et en E. M., à l'existence de phénomènes qui manifesteraient un mouvement (r. et u.) des corps pondérables par rapport à l'éther.

Nous avons dit ailleurs, à propos de l'article sur *la Dynamique de l'Electron* (1905), que Poincaré, qui se donnait alors pour tâche de perfectionner la dernière théorie de Lorentz, construite exprès pour satisfaire au postulat de relativité, s'y révélait, comme Lorentz lui-même, absolutiste au fond, en ce sens qu'il expliquait par des compensations la validité apparente des lois absolues dans les systèmes d'inertie mobiles, et qu'il maintenait le privilège de l'éther. N'empêche que, abstraction faite de ce travail constructif, toutes ses réflexions critiques s'inspiraient d'une conception relativiste du mouvement considéré soit en lui-même soit dans son influence sur les phénomènes physiques.

10. Poincaré et la critique de l'idée de simultanéité. — La relativité du mouvement est l'une des thèses principales de la théorie d'Einstein ; la relativité du temps en est une autre, non moins importante, et qui parut plus révolutionnaire ; pourtant sur ce point encore les voies avaient été préparées, par Lorentz et par Poincaré. Nous avons eu l'occasion d'exposer autre part la théorie du *temps local* de Lorentz, temps différent d'un système d'inertie à un autre, et qui, joint à l'hypothèse de la contraction, permettait d'écrire la fameuse transformation qui conserve aux équations de Maxwell la même forme dans les systèmes d'inertie mobiles que dans le système absolu, comme le demandait le postulat de relativité.

Nous avons expliqué aussi comment ce temps local aurait pu être fourni, dans chaque système, par des horloges mises d'accord par signaux lumineux moyennant cette convention que dans les systèmes d'inertie mobiles la lumière a toujours la même vitesse que dans le système absolu. Il est vrai que ce temps, bien que théoriquement ramené comme nous venons de le dire à un temps observable, demeurait pour Lorentz une grandeur fictive, le seul temps objectif idéal étant toujours le temps classique universel. Mais nous allons voir Poincaré, qui connaissait la

théorie du temps local, instituer une critique de l'idée de temps d'où il ressort que les hypothèses classiques sur la simultanéité ne s'imposent pas nécessairement, — ce qui signifiait qu'on en peut faire d'autres.

Dans *la Valeur de la Science*, donc en 1905, Poincaré se demande comment l'on peut s'assurer de la simultanéité de deux phénomènes qui se passent à distance l'un de l'autre ; comment par exemple font les marins pour connaître, sans être à Paris, l'heure de Paris⁽¹⁾. Et il montre que tous les procédés de réglage des chronomètres qui doivent servir en des lieux différents reposent sur des conventions, dont l'une des plus naturelles, quand on veut un réglage rigoureux, concerne la vitesse de la lumière. Sans doute il ne paraît pas songer à admettre, comme fera Einstein, autant de temps différents réels qu'il y a de systèmes d'inertie en mouvement les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire à regarder dans chaque système le temps local de Lorentz comme une grandeur naturelle ; il justifie au contraire le concept classique du temps universel par le recours plus ou moins explicite à une intelligence infinie témoin de tous les événements⁽²⁾. Mais il montre que le problème positif de la simultanéité est solidaire du problème de la vitesse de transmission des signaux, lumineux ou é. m., et il soumet pour finir toute définition de la simultanéité, de l'ordre de succession de deux événements, et de l'égalité de deux durées, à cette seule condition — qu'on croirait posée exprès pour la définition d'Einstein — qu'elle doit rendre aussi simple que possible l'énoncé des lois naturelles⁽³⁾.

11. Les matériaux de la construction relativiste chez les pré-décesseurs d'Einstein. — Nous pouvons nous arrêter ici, car nous sommes en 1905, au moment où Einstein va établir les bases de sa première théorie. On voit par l'exposé qui précède — tout incomplet et rapide qu'il soit — que cette théorie, comme il arrive souvent dans l'histoire des sciences, se trouvait préparée en ce sens du moins que les principales idées dont elle allait réaliser la synthèse hantaient depuis plus ou moins longtemps les cerveaux des physiciens.

⁽¹⁾ Poincaré : *La Valeur de la Science*, 1^{re} partie, ch. II, p. 55.

⁽²⁾ *Ibidem*, VII, p. 47.

⁽³⁾ *Ibidem*, VIII, p. 57.

Résumons-nous en énumérant ces idées, que nous retrouverons bientôt intégrées dans la doctrine relativiste. C'est d'abord l'idée chère à Boscovich et à Mach de la relativité du mouvement en lui-même, et surtout, en ce qui concerne l'influence du mouvement sur les phénomènes physiques, le principe du mouvement relatif, admis par Mach et par Poincaré ; idée et principe qu'Einstein ne fera qu'indiquer dans son premier Mémoire de 1905, mais dont il essayera de tirer toutes les conséquences en édifiant sa théorie de la relativité générale.

C'est ensuite, d'un point de vue moins ample mais plus précis, le principe — restreint — de relativité, autrement dit le postulat de l'équivalence de tous les systèmes *d'inertie* pour l'applicabilité de toutes les lois physiques ; postulat suggéré par l'échec des expériences destinées à déceler l'influence du mouvement de translation de la Terre ; admis comme à regret par Lorentz, mais hardiment proclamé par Mascart et par Poincaré.

C'est enfin l'idée de la multiplicité des temps, liée au postulat de l'identité de la vitesse de la lumière dans tous les systèmes d'inertie ; multiplicité et identité qu'Einstein fut le premier à regarder comme réelles, mais qui avaient été admises par Lorentz et par Poincaré comme des fictions remarquables, en ce sens précisément que jointes à l'hypothèse de la contraction elles donnaient un sens à la transformation de Lorentz, qui permettait de passer sans changement de forme des équations de Maxwell pour le système absolu aux équations de Maxwell pour les systèmes d'inertie mobiles, comme le voulait le principe de relativité (¹).

Mais des éléments épars d'une théorie à la théorie elle-même, il y a de la marge ; il manque encore la synthèse harmonieuse de ces éléments, l'énoncé explicite des postulats, la déduction méthodique des conséquences. Etablir la théorie c'est faire tout cela, et ce fut l'œuvre propre d'Einstein. Qu'on nous permette, avant d'exposer la doctrine du physicien relativiste en elle-même et d'un point de vue didactique, d'indiquer encore — pour n'avoir plus à revenir qu'incidentement sur les questions d'histoire — quelles furent les principales étapes de son établissement.

(¹) Nous avons étudié ailleurs la théorie de Lorentz-Poincaré, et montré qu'elle n'était au fond qu'un semi-relativisme.

12. Deux grandes étapes dans le développement de la doctrine relativiste : théorie restreinte et théorie générale de la relativité. —

Quand Einstein commença de s'occuper de Physique théorique, vers 1905, le seul problème que se posaient explicitement les physiciens était celui de la formulation des lois pour différents systèmes d'inertie, et, corrélativement, du caractère absolu ou simplement relatif des translations r . et u .

Einstein résolut immédiatement ce premier problème en posant en principe l'identité de toutes les lois fondamentales dans tous les systèmes d'inertie. Mais cette solution même suggérait logiquement un autre problème plus général que le premier : celui de la possibilité d'une formulation des lois valable pour des systèmes de référence quelconques.

Aussitôt résolu le premier problème, Einstein s'occupa du second. Nous verrons qu'en fait il ne put en fournir une solution qui soit la simple généralisation de la première théorie. Cependant, par une sorte d'équivoque de langage que nous aurons à dénoncer, la réponse d'Einstein au second problème fut appelée par lui « théorie de la relativité générale », tandis que par opposition la solution du premier problème devenait la « théorie de la relativité restreinte », ce qui peut il est vrai se justifier d'une autre façon, que nous préciserons plus tard. Sous cette réserve, on peut dire que la théorie restreinte et la théorie générale de la relativité constituent en droit les deux moments logiques de ce qu'on appelle maintenant la doctrine relativiste : ce furent aussi en fait les deux étapes principales de l'établissement de cette doctrine ; les deux étapes principales, mais pas les seules : pour se faire une idée d'ensemble suffisante du développement de la doctrine d'Einstein il convient de distinguer :

1^o la théorie de la relativité restreinte :

— le principe en fut énoncé par Einstein dans un Mémoire publié en 1905 sur l'*Electrodynamique des corps en mouvement* ⁽¹⁾. Les premières conséquences en furent déduites au cours des années suivantes par Einstein et par d'autres physiciens, puis heureusement vérifiées par diverses expériences.

2^o deux théories de transition :

⁽¹⁾ Pour les références complètes on est prié de se reporter à la Bibliographie.

— l'une, purement *mathématique*, proposée en 1908 par Hermann Minkowski, dans une conférence intitulée *Espace et Temps*, et qui formulait simplement le principe restreint de relativité en un langage nouveau, — langage « spatio-temporel » ou d'*Espace-Temps* — où temps et espace se trouvaient indissolublement unis. Cette formulation, outre qu'elle rendit possible une extension de la théorie restreinte à de nouveaux phénomènes, devait jouer un rôle capital dans la généralisation de la théorie de la relativité.

— l'autre, *physique*, relative à la gravitation, et proposée dès 1911 par Einstein dans une étude relative à *l'influence de la pesanteur sur la propagation de la lumière* : elle reposait sur un nouveau principe, celui de l'*équivalence*, pour tous les phénomènes et pas seulement pour les phénomènes mécaniques, d'un champ de gravitation uniforme et d'une accélération constante du système de référence ; principe qui préparait lui aussi l'établissement de la théorie générale.

3^o *la théorie générale de la relativité*, qui n'est en fait qu'une théorie de la gravitation et de la mécanique fondamentale conforme au postulat général de l'indépendance des lois physiques par rapport à nos façons de repérer les événements dans l'*Espace-Temps*. Les principes en furent publiés par Einstein en 1916, dans un mémoire intitulé : *Les fondements de la théorie générale de la Relativité*.

Les premières conséquences rigoureuses en furent déduites surtout par Schwarzschild, la même année, dans deux Mémoires sur le champ de gravitation d'une masse réduite à un point et sur celui d'une sphère. Après quoi de nombreux mathématiciens, physiciens et astronomes s'occupèrent du développement et du contrôle de la théorie ; car à partir de cette date, et surtout après la guerre, la doctrine d'Einstein se répandit, suscita de vives oppositions, mais plus encore d'enthousiasme, et donna lieu à un nombre énorme de publications ⁽¹⁾. Il faut rattacher à cette phase de son développement les théories relatives à la structure d'ensemble de l'Univers, dont la première est due à Einstein

⁽¹⁾ C'est l'abondance même de ces publications qui nous fait nous borner ici aux Mémoires absolument fondamentaux. Les autres travaux consultés par nous seront signalés au cours de notre exposé.

(1917), et la dernière en date — celle de l'Univers en expansion — due principalement à l'abbé Lemaître (1927).

4^o *des essais d'extension de la théorie générale* aux phénomènes autres que ceux de gravitation, en fait aux phénomènes é. m. Le principal Mémoire à signaler ici, dû à la collaboration d'Einstein et de W. Meyer, a été présenté à l'Académie des Sciences de Berlin en 1931 (¹).

Dans ses grandes divisions, notre travail reflètera les deux étapes principales du développement de la doctrine : théorie restreinte (chapitre I) et théorie générale (chap. III) ; après l'exposé de chacune nous étudierons, selon notre dessein propre, le rôle des systèmes de référence dans la théorie restreinte (chap. II) et celui des modes de repérage des événements dans la théorie générale (chap. IV). Nous ferons place aisément dans ce cadre aux deux théories de transition. Enfin nous terminerons, en guise de conclusion, par un essai critique sur les principes et l'esprit de la doctrine (chap. V).

(¹) Nous ne pouvons que signaler en passant les théories dans lesquelles H. Weyl et A. Eddington avaient déjà de leur côté étendu à l'E. M. la théorie générale d'Einstein. Voir : H. Weyl : *Temps, Espace, Matière*. Traduction G. Juvet et R. Leroy, 1. vol. Paris, 1922 (Première édition allemande 1918). Ch. iv, p. 248-276. et A. Eddington : *Espace, Temps et Gravitation*. Traduction J. Rossignol, 1 vol. Paris, 1921. Partie théorique. Section V, p. 116-149.



ERRATUM

Page 32, l. 5, *au lieu de* : à, *lire* : par rapport à.

Page 32, l. 24, *au lieu de* : à, *lire* : par rapport à.

Saint-Amand (Cher), France. — Imprimerie R. BUSSIÈRE. — 6-3-1937.



ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE MM.



F. ENRIQUES

De l'Académie *Dei Lincei*
Professeur à l'Université de Rome

PHILOSOPHIE ET HISTOIRE DE LA PENSÉE SCIENTIFIQUE

Ch. FABRY

Membre de l'Institut
Professeur à la Faculté des Sciences

OPTIQUE

E. FAURÉ-FREMIET

Professeur au Collège de France

BIOLOGIE

(Embryologie et Histogenèse)

Ch. FRAIPONT

Professeur à la Faculté des Sciences
de Liège

PALÉONTOLOGIE ET LES GRANDS PROBLÈMES DE LA BIOLOGIE GÉNÉRALE

Maurice FRECHET

Professeur à la Sorbonne

ANALYSE GÉNÉRALE

M. L. GAY

Professeur de Chimie-Physique
à la Faculté des Sciences de Montpellier

ThERMODYNAMIQUE ET CHIMIE

J. HADAMARD

Membre de l'Institut

ANALYSE MATHÉMATIQUE ET SES APPLICATIONS

Victor HENRI

Professeur à l'Université de Liège

PHYSIQUE MOLÉCULAIRE

A. F. JOFFÉ

Directeur de l'Institut Physico-Technique
de Leningrad

PHYSIQUE DES CORPS SOLIDES

A. JOUNIAUX

Professeur à l'Institut de Chimie de Lille

CHIMIE ANALYTIQUE

(Chimie Physique, minérale
et Industrielle)

N. K. KOLTZOFF

Directeur de l'Institut de Biologie
expérimentale de Moscou

Membre honoraire R. S. Edinburgh

LA GÉNÉTIQUE ET LES PROBLÈMES DE L'ÉVOLUTION

P. LANGEVIN

Membre de l'Institut
Professeur au Collège de France

L — RELATIVITÉ

II — PHYSIQUE GÉNÉRALE

Louis LAPICQUE

Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne

PHYSIOLOGIE GÉNÉRALE DU SYSTÈME NERVEUX

A. MAGNAN

Professeur au Collège de France

MORPHOLOGIE

DYNAMIQUE

ET MÉCANIQUE DU MOUVEMENT

Ch. MARIE

Directeur de Laboratoire
à l'Ecole des Hautes-Études

ÉLECTROCHIMIE APPLIQUÉE

Ch. MAURAIN

Membre de l'Institut
Doyen de la Faculté des Sciences
Directeur de l'Institut de Physique du Globe

PHYSIQUE DU GLOBE

André MAYER

Professeur au Collège de France

PHYSIOLOGIE

Henri MINEUR

Astronome à l'Observatoire de Paris
Maitre de Recherches

ASTRONOMIE STELLAIRE

Ch. MUSCLEANU

Professeur à la Faculté des Sciences
de Bucarest

PHYSIQUE GÉNÉRALE ET QUANTA

M. NICLOUX

Professeur à la Faculté de Médecine
de Strasbourg

CHIMIE ANALYTIQUE

(Chimie organique et biologique)

P. PASCAL

Correspondant de l'Institut
Professeur à la Sorbonne et à l'Ecole
Centrale des Arts et Manufactures

CHIMIE

GÉNÉRALE et MINÉRALE

Ch. PÉREZ

Professeur à la Sorbonne

BIOLOGIE ZOOLOGIQUE

CATALOGUE SPÉCIAL SUR DEMANDE

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE MM.



J. PERRIN

Membre de l'Institut

Prix Nobel de Physique

Professeur à la Faculté des Sciences
de Paris

ATOMISTIQUE

Marcel PRENANT

Professeur à la Sorbonne

L. — BIOLOGIE ÉCOLOGIQUE
IL. — LEÇONS DE ZOOLOGIE

A. REY

Professeur à la Sorbonne

HISTOIRE DES SCIENCES

Y. ROCARD

Maitre de Recherches

THÉORIES MÉCANIQUES
(Hydrodynamique-Acoustique)

R. SOUÈGES

Cher de Travaux
à la Faculté de Pharmacie

EMBRYOLOGIE
ET MORPHOLOGIE VÉGÉTALES

TAKAGI

Professeur à l'Université Impériale de Tokyo

MATHÉMATIQUES GÉNÉRALES

TAMIYA-(HIROSHI)

Membre du Tokugawa Biologisches
Institut-Tokyo

BIOLOGIE (Physiologie cellulaire)

A. TCHITCHIBABINE

Membre de l'Académie des Sciences
de l'U. R. S. S.

CHIMIE ORGANIQUE

(Série hétérocyclique)

Georges TEISSIER

Sous-directeur de la Station
Biologique de Roscoff

BIOMÉTRIE

ET STATISTIQUE BIOLIQUE

G. URBAIN

Membre de l'Institut

Professeur à la Faculté des Sciences de Paris

THÉORIES CHIMIQUES

Pierre URBAIN

Maitre de Conférences à l'Institut
d'Hydrologie et de Climatologie de Paris

GÉOCHIMIE

Y. VERLAINE

Professeur à l'Université de Liège

PSYCHOLOGIE ANIMALE

P. WEISS

Membre de l'Institut
Directeur de l'Institut de Physique
de l'Université de Strasbourg

MAGNÉTISME

R. WURMSER

Directeur du Laboratoire de Biophysique
de l'Ecole des Hautes-Etudes

BIOPHYSIQUE

Actualités Scientifiques et Industrielles

Série 1937 (suite) :

466. LÉON BINET et GEORGES WELLER. Le glutathion.....	20 fr.
467. GEORGES MATISSE. La question de la finalité en Physique et en Biologie. I. — Principes généraux. Lois : d'économie, d'extrême, de simplicité.....	10 fr.
468. GEORGES MATISSE. La question de la finalité en Physique et en Biologie. II. — Faits particuliers. Dispositifs et phénomènes présentés par les êtres vivants. Examen critique des théories.....	
469. H. I. MARESQUELLE. Signification générale de la différence sexuelle.....	18 fr.
470. M. COLLIN. L'hypertonie de la glande pituitaire (Anatomie et Physiologie).....	18 fr.
471. M. ARCAY. Les ultrasons et leurs applications.....	20 fr.
472. GEORGES BOURION. L'ultraconvergence des séries de Taylor.....	15 fr.
473. M. LACROUTE. Règles d'absorption dans les spectres stellaires.....	12 fr.
474. GASTON RICHARD. La conscience morale et l'expérience morale.....	20 fr.
475. GASTON RICHARD. La Loi morale, les Lois naturelles et les Lois sociales.....	15 fr.
476. L. ESCANDE. Barrages. I. — Calcul des barrages poids à profil triangulaire. Théorie et calculs.....	15 fr.
477. L. ESCANDE. Barrages. II. — Calcul des barrages poids à profil triangulaire. Pratique du calcul. Abaques relatifs au cas ou $N=0,03$	20 fr.
478. L. ESCANDE. Barrages. III. — Profil optimum de barrage déversoir. Truee aérodynamique des piles.....	20 fr.



LISTE COMPLÈTE A LA FIN DU VOLUME